

Institut für Wasserbau und Wasserwirtschaft
Technische Universität Darmstadt



Einsatz, Funktion und Aufbau kleiner Sohlenbauwerke

Am Fachbereich Bau- und Umweltingenieurwissenschaften
der Technischen Universität Darmstadt angefertigte und
beim Fachgebiet für Wasserbau und Hydraulik vorgelegte

Bachelorlorthesis

von

Annika Scheidler

aus Aschaffenburg (Matrikelnummer 2974516)

Referent: Prof. Dr.-Ing. habil. B. Lehmann

Tag der Einreichung: 31.01.2019

Darmstadt, im Januar 2019

Veröffentlicht unter CC BY-NC-ND 4.0 International

Inhaltsverzeichnis

Abkürzungsverzeichnis	ii
Symbolverzeichnis.....	iii
Abbildungsverzeichnis.....	vi
Tabellenverzeichnis.....	vii
1. Einleitung	1
2. Überblick über die Sohlenbauwerke	2
3. Baustoffe und Bauverfahren	4
4. Verschiedene Bauweisen von Sohlenbauwerken	8
4.1. Abstürze und Absturztreppen.....	8
4.2. Sohlenrampen und Sohlengleiten.....	11
4.2.1. Die klassische Bauweise	13
4.2.2. Die naturnahe Bauweise	14
4.2.3. V-Rampen.....	16
4.3. Grund- und Sohlenschwellen	19
4.4. Stützwellen und kleine Stauanlagen	21
5. Bemessungsansätze für Sohlenbauwerke	24
5.1. Allgemeine Bemessungsgrundsätze und Bemessungsabfluss.....	24
5.2. Hydraulische Wirksamkeit und Fließzustände	29
5.3. Bemessung von Absturzbauwerken	32
5.4. Bemessung von Rampen und Gleiten	35
5.5. Bemessung von Schwellen	41
5.6. Stabilitätsnachweise für Wasserbauwerke	44
5.7. Ökologische Aspekte der Bemessung.....	47
6. Vorgehen bei der Sanierung	53
7. Zusammenfassung, Empfehlung und Ausblick	57
Literaturverzeichnis.....	58
Anhangsverzeichnis.....	60

Abkürzungsverzeichnis

DVWK	Deutscher Verband für Wasserwirtschaft und Kulturbau e.V.
DWA	Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V.
engl.	englisch
HW	Hochwasser
LUBW	Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden- Württemberg
MHQ	Mittleres Hochwasser
NW	Niedrigwasser
OW	Oberwasser
USACE	United States Army Corps of Engineers
UW	Unterwasser

Symbolverzeichnis

A	Querschnittsfläche	[m ²]
b	Querschnittsbreite	[m]
b _a	Querschnittsbreite am Absturz	[m]
b _o	Querschnittsbreite im Oberwasser	[m]
b _R	Breite der Rampe	[m]
b _u	Querschnittsbreite im Unterwasser	[m]
c _q	Abflussbeiwert	[-]
d ₆₅	Steindurchmesser bei 65% Siebdurchgang	[m]
D _{Fisch}	Dicke des Fisches	[m]
d _s	äquivalenter Steindurchmesser	[m]
e	Schwellenhöhe	[m]
E	Erddruck	[N]
F	Aufstandsfläche Bauwerk	[m ²]
Fr	Froude-Zahl	[-]
Fr _s	Steinbezogene Froude-Zahl	[-]
g	Fallbeschleunigung	[m/s ²]
G	Gewichtskraft Bauwerk	[N]
H	Bauwerkshöhe	[m]
h	Wasserhöhe	[m]
H _B	Überfallhöhe	[m]
H _E	spezifische Energiehöhe	[m]
H _{Fisch}	Höhe des Fisches	[m]
h _{gr}	Grenztiefe des Fließgewässers	[m]
h _i	kleinste Wassertiefe vor der Deckwalze	[m]
H _K	horizontale Kräfte	[N]
h _o	Wassertiefe im Oberwasser	[m]
h _ö	Wassertiefe am Ende der Deckwalze	[m]

H_P	Potentialhöhe/ Fallhöhe	[m]
h_R	Rampenhöhe	[m]
h_u	Wassertiefe im Unterwasser	[m]
H_w	wirksame Absturzhöhe	[m]
I	Sickergefälle	[-]
I_a	Sohlengefälle nach dem Ausbau	[-]
I_{crit}	kritisches Sickergefälle	[-]
I_m	mittleres Sohlengefälle vor dem Ausbau	[-]
I_R	Rampenneigung	[-]
I_s	Sohlengefälle	[-]
I_{zul}	zulässiges Sohlengefälle	[-]
k_f	Durchlässigkeitsbeiwert nach Darcy	[m/s]
k_s	äquivalente Sandrauheit	[m]
k_{st}	Strickler-Beiwert	[m ^{1/3} /s]
$k_{st,R}$	Strickler-Beiwert für die Rampe	[m ^{1/3} /s]
L_{Fisch}	Länge des Fisches	[m]
l_{ko}	Befestigungslänge vor dem Absturz	[m]
l_{ku}	Befestigungslänge nach dem Absturz	[m]
l_{pf}	Länge Pfahl	[m]
m	Anzahl an Stromröhren	[-]
m_s	Masse der Steine	[kg je Stein]
n	Anzahl der Potentialstufen	[-]
n_A	Auftriebssicherheit	[-]
n_{Gl}	Gleitsicherheit	[-]
n_K	Kippsicherheit	[-]
Q	Abfluss	[m ³ /s]
q	Sickerwassermenge	[m ³ /s]
q_R	spezifischer Abfluss auf der Rampe (strömender Abfluss)	[m ³ /(s m)]
$q_{R,crit}$	kritischer spezifischer Abfluss	[m ³ /(s m)]

$q_{R,ist}$	spezifischer Abfluss auf der Rampe (bei Fließwechsel)	$[m^3/(s\ m)]$
$q_{R,max}$	maximaler spezifischer Abfluss	$[m^3/(s\ m)]$
r_{hy}	hydraulischer Radius	$[m]$
S	Sohlenwasserdruck	$[N]$
s	Stärke der betrachteten Stromröhre	$[m]$
v	Fließgeschwindigkeit	$[m/s]$
V	vertikale Kräfte	$[N]$
v_m	mittlere Fließgeschwindigkeit	$[m/s]$
v_o	Fließgeschwindigkeit im Oberwasser	$[m/s]$
w	Rampenkrone	$[m]$
W	Wasserdruck	$[N]$
WA	Wasserauflast	$[N]$
β_o	Einengungszahl im Oberwasser	$[-]$
β_u	Einengungszahl im Unterwasser	$[-]$
λ	Widerstandsbeiwert	$[-]$
μ	Überfallbeiwert	$[-]$
ρ	Dichte des Wassers	$[kg/m^3]$
ρ_s	Dichte der Steine	$[kg/m^3]$
τ_o	Grenzscherpspannung	$[N/m^2]$
τ_s	Kohäsion	$[N/m^2]$
Φ	Reibungszahl	$[-]$

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Einteilung der Sohlenbauwerke.....	2
Abbildung 2: Wasserhaltung beim Bau von Sohlenbauwerken.....	5
Abbildung 3: Einsatz von Baggern und Steingreifern.....	5
Abbildung 4: Aufbau eines Absturzes mit Kolkbildung.....	8
Abbildung 5: Sohlenschalen einer Fertigteilabsturztreppe	10
Abbildung 6: Aufbau einer Rampe in klassischer Bauweise.....	13
Abbildung 7: Aufbau einer Sohlenrampe	14
Abbildung 8: Ausbildungsformen von Rampen und Gleiten.....	15
Abbildung 9: Aufbau einer V-Rampe	16
Abbildung 10: Vergleich der Aufstaucharakteristik von Rampen.....	17
Abbildung 11: Formen der Seitenstrukturen einer V-Rampe	17
Abbildung 12: Verschiedene Bauweisen von Sohlen- und Grundschnellen	19
Abbildung 13: Schema einer Steinschnelle aus Natursteinblöcken	20
Abbildung 14: Grundschnellen aus Pfahlreihe und Schüttsteinen.....	20
Abbildung 15: Schema der Anströmung eines Wehres	21
Abbildung 16: Aufbau eines festen Wehres/Stützschnelle.....	22
Abbildung 17: Schritte bei der Bemessung von Sohlenbauwerken	27
Abbildung 18: Abflussvorgang mit zweifachem Fließwechsel	30
Abbildung 19: Abflussvorgang auf der Rampe bei verschiedenen Abflüssen.....	31
Abbildung 20: Abflusstypen bei einem Absturz.....	32
Abbildung 21: Befestigungslängen vor und hinter einem Absturz	34
Abbildung 22: Grafische Auswertung verschiedener Ansätze zur Steinstabilität.....	38
Abbildung 23: Abflussvorgang auf einer Grundschnelle	41
Abbildung 24: Überfallbeiwerte für die Poleni-Formel.....	42
Abbildung 25: Optimale Wehrrückenform nach USACE.....	43
Abbildung 26: Kräfte auf ein Wehr	44
Abbildung 27: Potentialnetz des Bodenkörpers unter einem Wehr.....	46
Abbildung 28: Raugerinne mit zu geringer Wassertiefe	48
Abbildung 29: Dimensionierungsrelevante Körpermaße von Fischen	51
Abbildung 30: Prüfschema zur Ermittlung der Rückbaumöglichkeiten.....	55
Abbildung 31: Teilrampen an Wehren.....	56

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Mögliche Überfallformen für Abstürze	9
Tabelle 2: Wanderhindernisse für verschiedene Organismen	10
Tabelle 3: Vergleich der glatten und rauen Rampe	12
Tabelle 4: Mögliche Wehrrückenformen	23
Tabelle 5: Fließzustände an Sohlenstufen.....	29
Tabelle 6: Voraussetzungen für eine Endschwelle	34
Tabelle 7: Grenzwerte für die maximale Fließgeschwindigkeit v_{\max}	50
Tabelle 8: Geometrische Grenzwerte nach Fischmaßen	52

1. Einleitung

Seit jeher leben die Menschen bevorzugt an Flüssen. Sie stellen die Lebensader dar, durch die die Gesellschaft vielfachen Nutzen zieht, sei es als Transportweg, zur Nahrungsgewinnung und Bewässerung oder zur Energiegewinnung. Fast genauso lange schon greift der Mensch in das Ökosystem Fluss mit verschiedenen wasserbaulichen Maßnahmen ein, um den Nutzen zu maximieren und sich gleichzeitig vor den Naturgefahren des Wassers zu schützen. Nicht nur große Flüsse wurden verändert, wie zum Beispiel bei der Rheinbegradigung. Auch an vielen kleinen und mittleren Flüssen wurden Bauwerke errichtet, die den Fluss regulieren und zähmen sollten – die Sohlenbauwerke.

Viele dieser Bauwerke wurden vor vielen Jahren in die Flüsse gebaut, sodass diese jetzt häufig baufällig sind oder nicht mehr den heutigen Gegebenheiten genügen. Ebenfalls gab es einen enormen Fortschritt in der Technik insbesondere im Wasserbau, was neue Verfahren und Bauweisen hervorbrachte. Bis heute bedarf es einer Weiterentwicklung, um den vielen Aufgaben gerecht zu werden, die die Sohlenbauwerke erfüllen sollen. Gerade im Zuge der Wasserrahmenrichtlinie und den gesteigerten Anforderungen an ökologische Durchgängigkeit müssen neue Bauformen umgesetzt oder erst neu entwickelt werden.

Ziel dieser Arbeit ist es daher, den Stand der Technik hinsichtlich des Einsatzes, der Funktion und des Aufbaus sowie möglicher Sanierungsmaßnahmen zu Sohlenbauwerken und kleinen Stauanlagen darzulegen, um mögliche neue Forschungen an der TU Darmstadt abzuwägen. In Kooperation mit dem Institut für Statik und Konstruktion sollen neue Baustoffe und Bauverfahren mithilfe der textilen Schalung ermittelt werden, um Sohlenbauwerke zu verbessern.

Dabei gliedert sich die Arbeit in sieben Kapitel:

Nach diesem ersten einleitenden Kapitel wird zuerst ein Überblick als Einordnung der Sohlenbauwerke im Wasserbau gegeben. Daraufhin zeigt das dritte Kapitel allgemeine Bauverfahren und Baustoffe für derartige Bauwerke auf. Das folgende vierte Kapitel erläutert dann die einzelnen Bauwerkstypen innerhalb der Sohlenbauwerke. Es werden eine Definition und besondere Merkmale des Bauwerktyps gegeben, geeignete Baustoffe und Konstruktionsformen erläutert und auf mögliche Folgen des Bauwerkes eingegangen. Danach werden in Kapitel 5 sowohl allgemeine Bemessungsgrundsätze zu Sohlenbauwerken, als auch Ansätze für bestimmte Bauwerkstypen dargelegt. Anschließend werden im sechsten Kapitel verschiedene Möglichkeiten der Sanierung bei Sohlenbauwerken hinsichtlich ökonomischer und ökologischer Gesichtspunkte diskutiert. Zum Schluss werden im siebten Kapitel die Ergebnisse zusammengefasst und eine Ausblick auf künftige Entwicklungen gegeben.

2. Überblick über die Sohlenbauwerke

Nach DIN 4047 sind Sohlenbauwerke (engl. river bottom protection structure) definiert als Querbauwerke, die die Sohlenerosion in Flüssen verhindern und sich über die gesamte Querschnittsbreite erstrecken (1989-03). Folglich gibt es in dieser Bauwerksgruppe des Wasserbaus verschiedene Unterteilungen nach Bauart (Abbildung 1), die je nach Aufgabe an Flüssen eingesetzt werden.

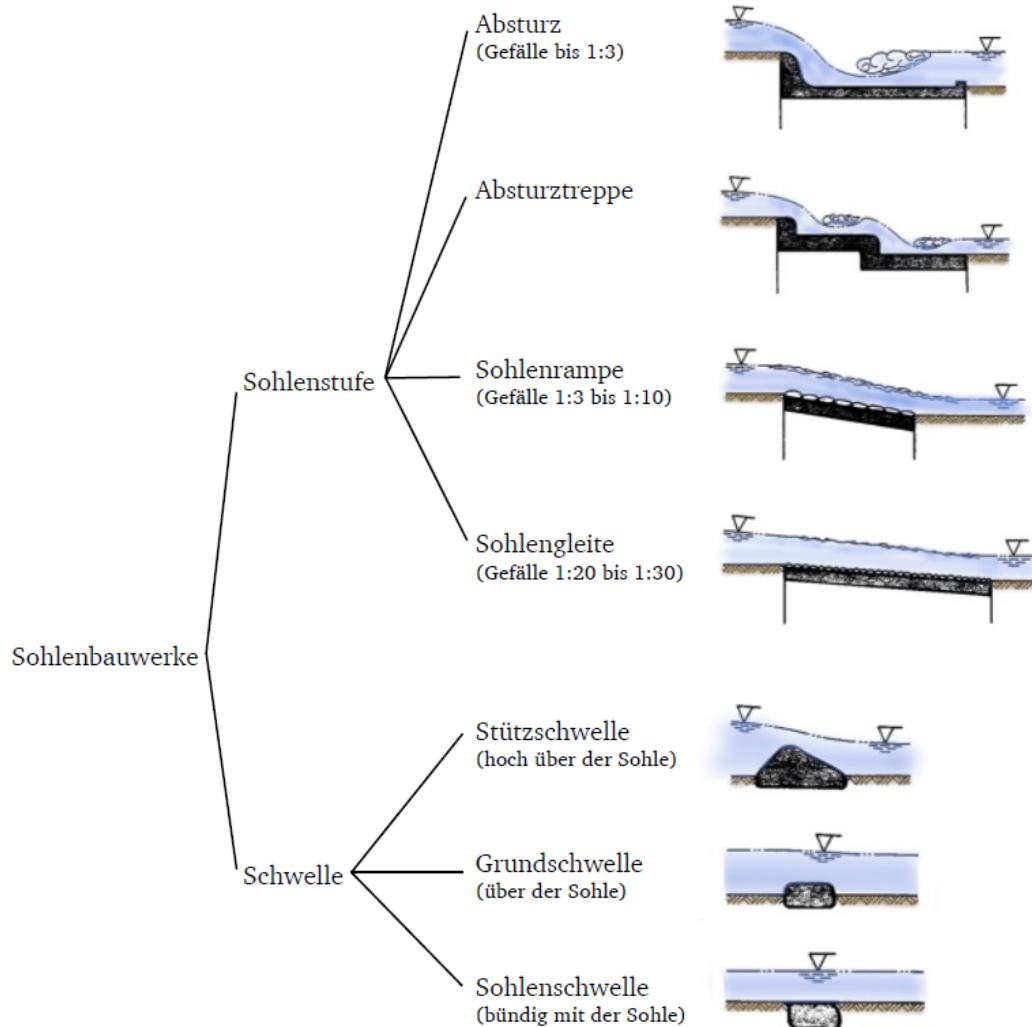


Abbildung 1: Einteilung der Sohlenbauwerke (nach DIN4047-5, 1989-03)

Die primäre Aufgabe von allen Sohlenbauwerken ist es, die Sohle zu stabilisieren und diese vor Tiefenerosion zu schützen (Gebler, 1991). Ebenfalls können Sohlenbauwerke dazu dienen, das Sohlengefälle vor und nach dem Bauwerk zu verringern (Patt und

Gonsowski, 2011), ein Stauziel zu halten, die Gewässersohle zu fixieren und das Gewässer hydraulisch durch Energieumwandlung zu entlasten sowie die ökologische Durchgängigkeit sicherzustellen (Gebler, 2009). Kleine Stauanlagen, die ebenfalls zu den Sohlenbauwerken zählen, können zusätzlich für die Energiegewinnung oder die Bewässerung landwirtschaftlicher Flächen gebaut werden (Lattermann, 2005) .

Um diese Aufgaben je nach Art und Parametern des Gewässers oder des jeweiligen Gewässerabschnittes zu erfüllen, gibt es eine Vielzahl von Bauweisen, die in verschiedene Gruppen zusammengefasst werden können. Generell unterscheidet man bei Sohlenbauwerken zwischen Stufen und Schwellen (Abbildung 1). Während Stufen (engl. river bottom steps) einen Höhenunterschied in der Sohle überwinden, verhindern Schwellen (engl. sill) zunächst ohne Veränderung des Sohlengefälles die Erosion (DIN4047-5, 1989-03). Allerdings ist hierbei der Übergang fließend (Gebler, 1991).

Diese beiden Grundtypen von Sohlenbauwerken können weiter unterteilt werden. Konstruiert werden Sohlenstufen entweder als Absturz mit „lotrechter oder steil geneigter Absturzwand “ (DIN4047-5, 1989-03) oder als Sohlenrampe oder -gleite, bei denen ein geringeres Gefälle von 1:3 bis 1:10 bzw. 1:20 bis 1:30 vorliegt. Des Weiteren wird bei der Einteilung die Absturztreppe, die als Kaskade aus mehreren aufeinanderfolgenden Abstürzen besteht, separat betrachtet (DIN19661-2, 2000-09).

Schwellen teilen sich auf in Grund-, Sohlen- und Stützwellen bzw. Stützwehre, die je nach ihrer Lage in der Sohle klassifiziert werden.

Auf verschiedene Bauweisen der jeweiligen Bauwerke der Gruppe der Sohlenbauwerke wird im Kapitel 4 näher eingegangen.

Durch den Einsatz von Sohlenbauwerken wird in das Fließgewässersystem eingegriffen. So entstehen verschiedene Auswirkungen auf das Gewässer und das Ökosystem, die zum Teil beabsichtigt (vgl. Aufgaben), zum Teil aber auch unbeabsichtigt sind bzw. negative Folgen haben. Auf verschiedene Auswirkungen und die daraus resultierenden Anforderungen an die ökologische Bemessung wird in Kapitel 5.7 näher eingegangen.

3. Baustoffe und Bauverfahren

Sohlenbauwerke liegen, wie der Name schon sagt, direkt in der Sohle des Gewässers. Hieraus ergeben sich verschiedene Anforderungen an den Bau, sowohl hinsichtlich der Baustoffe als auch der Verfahren beim Bau dieser Bauwerke.

Will man Sohlenbauwerke in ein Gewässer bauen, so müssen die Schonzeiten der Fischfauna eingehalten werden (Gebler, 2009). Ebenfalls sollte der Bau möglichst in der hochwasserarmen Zeit erfolgen, sodass kein Aufstau des Oberwassers erfolgt (DIN19661-2, 2000-09). Hierfür müssen gegebenenfalls weitere Wasserhaltungsmaßnahmen erfolgen.

Grundsätzlich kann der Bau von Sohlenbauwerken direkt im Gewässer geschehen, im künftigen Durchstich oder im freien Gelände. Dies ist abhängig vom bisherigen Gewässerabschnitt und der Lage des Bauwerkes. Gegebenenfalls kann auch der Fluss vorübergehend umgeleitet werden, um im Gewässerbett zu bauen. (DIN19661-2, 2000-09)

Die Wasserhaltung richtet sich stark nach dem Bauwerkstyp und den Baustoffen (Abbildung 2). Einige Sohlenbauwerke, vor allem an kleinen Gewässern, können direkt im fließenden Wasser erstellt werden. Gerade bei der Arbeit mit Beton ist aber meist eine trockene Bauweise notwendig, um einen Zementaustrag zu vermeiden. Hierzu kann entweder der Bau halbseitig mit einfachem Fangdamm erfolgen, sodass keine Pumpen erforderlich sind, oder der Fluss wird mit Rohren umgeleitet. Auch beim Bau von Filterschichten und bei schwierigen Untergrundverhältnissen empfiehlt sich eine trockene Bauweise. (Gebler, 2009)



Abbildung 2: Wasserhaltung beim Bau von Sohlenbauwerken **a** in fließender Welle, **b** mit halbseitiger Umspundung, **c** mit Verbauelementen und Bigpacks, **d** mit seitlicher Umleitung des Abflusses (Gebler, 2009)

Zum Errichten von Sohlenbauwerken kommen verschiedene Geräte zum Einsatz. Grundsätzlich wird mit Baggern gearbeitet, da meist große und schwere Teile wie Steine oder Betonfertigteile verbaut werden (Abbildung 3).

Große Blöcke können von Baggern mithilfe von angebohrten Felsankern und Stahlbügeln in den Fluss eingesetzt oder an Bändern und Ketten am Bagger fixiert werden. Allerdings ist häufig ein professioneller Steingreifer zum Setzen der Blöcke sicherer, da hier die Blöcke weniger leicht abrutschen. Zudem lassen sie sich so präziser platzieren. (Gebler, 2009)

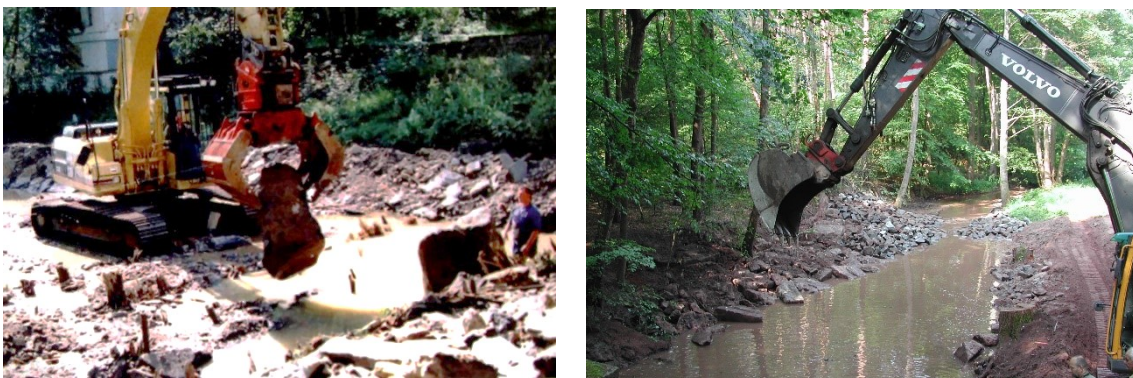


Abbildung 3: Einsatz von Baggern und Steingreifern (Saurenhaus, 2018, Gebler, 2009)

Detaillierte Bauverfahren müssen den örtlichen Gegebenheiten sowie dem Bauwerkstyp angepasst werden. Ebenfalls spielen die Baustoffe eine wichtige Rolle in der Wahl der Bauverfahren. Im Folgenden werden grundsätzlich mögliche Baustoffe diskutiert. In Kapitel 4 werden dann geeignete Baustoffe den jeweiligen Bauweisen zugeordnet.

Grundsätzlich kann man zwischen klassischen Baustoffen, wie Beton, Stahl und Wasserbausteine, und eher naturnahen Baustoffen, wie Natursteine und Holz, unterscheiden. Die generellen Anforderungen sind aber gleich. Die Baustoffe müssen stabil, langlebig, beständig gegen Umwelteinwirkungen und gleichzeitig kostengünstig sein (Lattermann, 2005).

Eine große Gruppe von möglichen Baustoffen für Sohlenbauwerke stellen die Natursteine dar. Die Bandbreite an Natursteinen ist groß. Es wird sowohl Sand und Kies als Füll- und Filtermaterial im Unterbau als auch Schotter, Gerölle und Schüttsteine verwendet. Ebenfalls kommen größere Setzsteine und Blöcke zum Einsatz. All diese Gesteine müssen frostbeständig, abrieb- und schlagfest sowie widerstandsfähig gegenüber Verwitterung sein (Patt et al., 2011). Hierzu eignen sich besonders Tiefengesteine, Ergusssteine, Sandsteine und Konglomerate mit kieseligen Bindemitteln oder kompakte Kalksteine (Hentze, 1967). Sowohl die Größe als auch die Gesteinsart sollte sich dem jeweiligen Fließgewässer anpassen (Patt et al., 2011).

Neben den Natursteinen kommen ebenfalls Kunststeine für Sohlenbauwerke in Frage. Hierzu zählen gebrannte Steine und Wasserbausteine aus Beton oder Schlacke, die in verschiedensten Größen und Formen erhältlich sind (Hentze, 1967).

Nicht nur Wasserbausteine, sondern auch andere Bauteile sind aus Beton fertigbar, was einen weiteren Baustoff für Sohlenbauwerke darstellt. Sowohl Ortbeton als auch Fertigbetonteile werden hier eingesetzt. Wichtig ist, dass der Beton nur mit amtlich zugelassenen Bindemitteln versetzt sein darf und der Betongüte B300 mit $300 \frac{kg}{m^3}$ Mindestzementgehalt entsprechen muss (Hentze, 1967). Beton wird sowohl als Einzelbaustoff für ganze Sohlenbauwerke benutzt als auch als Stabilisationsmittel, um z.B. Natursteine zu fixieren. Fertigbauteile können passgenau gegossen und leicht eingebaut werden, was zu kurzen Bauzeiten führt (Lattermann, 2005).

Ein weiterer Naturbaustoff für Sohlenbauwerke ist Holz. Dieses darf allerdings nicht in der Wasser-Wechselzone eingebaut werden, sondern muss kontinuierlich mit Wasser bedeckt sein, damit es langlebig ist (Patt et al., 2011). Meist wird Holz in Kombination mit

anderen Baustoffen verwendet und nicht als Einzelbaustoff, z.B. als Pfähle zur Stabilisation des Bauwerkes (Lattermann, 2005).

Zum Bau von Filter- und Trennschichten können des Weiteren Kunststoffe bzw. Geotextilien dienen. Sowohl künstliche als auch pflanzliche Gewebe können eingesetzt werden. (Patt et al., 2011)

Nur in Ausnahmefällen werden Zement, Bitumen oder Stahl zum Bau von Sohlenbauwerken verwendet (Lattermann, 2005). Allerdings bietet sich manchmal ein Stahlpfahl zur Stabilisation oder Stahl zum Schutz gegen Korrosion an (Hentze, 1967).

Somit gibt es eine Reihe von möglichen Baustoffen, die allein oder in Kombination angewendet werden können. Deren Einsatz ist bei jedem Projekt hinsichtlich des Bautyps und der örtlichen Gegebenheiten abzuwägen.

4. Verschiedene Bauweisen von Sohlenbauwerken

Die in Kapitel 2 beschriebenen Bauwerkstypen können eine Vielzahl von konstruktiven Bauformen aufweisen. Sowohl klassische konstruktive Bauweisen als auch naturnahe, die man heutzutage häufig wegen ihrer ökologischen Bedeutung einsetzt, werden hier beschrieben.

Die Wahl der jeweiligen Bauweise hängt stark von den Eigenschaften des Gewässerabschnitts, der Größe, den Strömungsbedingungen und dem Gefälle ab. Je nach Bauart der Stufe oder Schwelle werden andere Anforderungen an die Konstruktion gestellt, damit die Aufgaben des Bauwerks effektiv erfüllt werden können. Somit kommt es zu unterschiedlichen Beeinflussungen und Folgen für das Gewässer.

4.1. Abstürze und Absturztreppe

Abstürze sind Sohlenstufen mit senkrechter Absturzwand, bei der sich der Wasserstrahl ablöst, oder mit stark geneigter Schussrinne mit anliegendem Strahl (DIN19661-2, 2000-09). Sie sind die kürzesten Sohlenstufen und bilden nach der Wand einen Wechsprung aus, da ein Fließwechsel von Strömen zu Schießen und wieder zu Strömen stattfindet (DIN19661-2, 2000-09). Durch den Absturz wird das Sohlengefälle oberstrom und unterstrom reduziert und somit die Fließgeschwindigkeit und die Sohlenerosion verringert. Hinter dem Bauwerk entsteht ein Kolk, der gegebenenfalls mit einem Tosbecken stabilisiert werden muss, sodass die Sohle nicht zu stark erodiert wird (Abbildung 4).

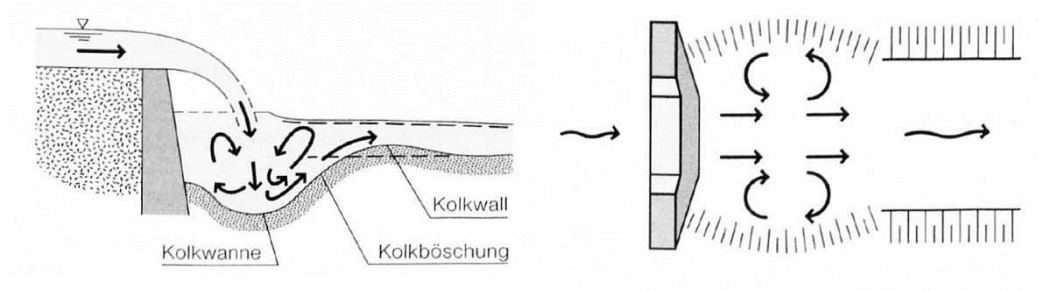








Abbildung 4: Aufbau eines Absturzes mit Kolkbildung (nach Lange, 1993)

Als Absturztreppe werden Kaskaden „aus mehreren aufeinanderfolgenden einzelnen Abstürzen“ (DIN19661-2, 2000-09) bezeichnet, die „sich gegenseitig hydraulisch beeinflussen“ (DIN19661-2, 2000-09). Häufig tritt dann erst an der letzten Stufe der Fließwechsel auf.

Die Konstruktion dieser „stützmauerartige[n] Sperren“ (Patt und Gonsowski, 2011) erfolgt aus Beton, Bruchsteinen oder Holz. Bei geraden Gewässerabschnitten stehen Abstürze rechtwinklig zur Fließrichtung, bei gekrümmten Abschnitten schräg, sodass das Wasser vom äußeren Ufer der Gewässerschleife weggeleitet wird. Soll der Hauptwasserstrahl zur Mitte hingelenkt werden, kann der Absturz in der Mitte gesenkt oder die Form leicht gekrümmt werden. Die Überfallkante ist entweder bündig mit der Sohle oder ragt etwas über diese hinaus, sodass der Absturz gleichzeitig eine kleine Schwelle darstellt (Petschallies, 1989). Die Überfallkrone kann in verschiedenen Querschnittsformen ausgeführt werden, entweder rechteckig, trapez- oder dreiecksförmig (Tabelle 1).

Tabelle 1: Mögliche Überfallformen für Abstürze (nach DIN19661-2, 2000-09)

Überfallform	Skizze
Rechteckig mit scharfen Kanten	
Rechteckig mit abgerundeten Kanten	
Dachförmig mit abgerundeter Überfallkrone	
Trapezförmig	
Dreiecksförmig mit abgerundeter Spitze	
Vollständig abgerundet und überstehend	

Für Absturztreppen können dieselben Konstruktionsformen angewendet werden. Zusätzlich gibt es Fertigteile aus Beton (Abbildung 5), die nur noch in das Gewässerbett eingesetzt werden müssen. Diese können wegen ihrer geringen Absturzhöhe der einzelnen Stufen eingeschränkt auch als Fischeaufstieg genutzt werden (Petschallies, 1989). Allerdings ist den Absturztreppen eine Rampe ohne zu überwindende Stufe vorzuziehen.

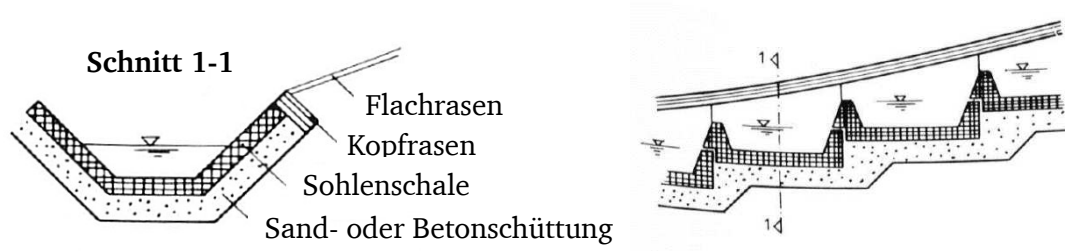


Abbildung 5: Sohlenschalen einer Fertigteilabsturztreppe (nach Petschallies, 1989)

Neben den gewollten Veränderungen hat der Absturz auch negative Folgen, vor allem in Bezug auf die Ökologie und die Durchgängigkeit des Gewässers. Generell stellen Abstürze ein Wanderhindernis für Organismen dar, sodass die natürliche Ausbreitung von Fischen und kleinen Wasserlebewesen beeinträchtigt oder ganz verhindert wird. Hütte (2000) hält deshalb nur Abstürze für ökologisch vertretbar, wenn sie eine Höhe unter 20 cm besitzen und variable Absturzhöhen im Querschnitt aufweisen. Folgende Grafik (Tabelle 2) zeigt, dass Abstürze größerer Höhe gerade bei der Wanderung flussaufwärts ein Hindernis darstellen. Zwar kommen größere Fische wie Forellen auch noch über höhere Abstürze, jedoch können Kleinfische und andere Wasserorganismen diese nur bedingt überwinden. Natürlich ist diese Unterteilung in der Tabelle nicht sehr genau, doch gibt sie Anhaltspunkte für eine Absturzhöhe. Ebenfalls müssen weitere Parameter wie die Wassertiefe beachtet werden. Detailliertere Beschreibungen sind in Kapitel 5.7 zu finden.

Im Anhang 1 sind Beispiele zu verschiedenen Abstürzen zu finden.

Tabelle 2: Wanderhindernisse für verschiedene Organismen (nach Hütte, 2000)

Wanderung	Absturz, 70cm hoch		Absturz, 30cm hoch		Sohlenrampe/-gleite	
	Auf	ab	Auf	Ab	Auf	Ab
Ausgewachsene Forellen	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Kleinfische	✗	✓	✗	✓	(✓)	(✓)
Fliegende Wasserinsekten	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Wirbellose	✗	✓	(✗)	✓	(✓)	✓

✓ = Wanderung möglich

(✓) = Wanderung größtenteils/wahrscheinlich möglich

(✗) = Wanderung zumeist/wahrscheinlich nicht gegeben

✗ = Wanderung nicht gegeben

4.2. Sohlenrampen und Sohlengleiten

Sohlenrampen und Sohlengleiten, die ebenfalls zu den Sohlenstufen gehören, sind länger als Abstürze und haben ein größeres Gefälle. Sie haben einen Schussboden mit rauer Oberfläche, dem ein Tosbecken oder ein naturnaher Kolk folgt. Die Rampe unterscheidet sich von der Gleite durch ihr etwas größeres Gefälle von ca. 1:3 bis 1:10, während die Gleite mit einem Gefälle von 1:20 bis 1:30 flacher geneigt ist. Die Energieumwandlung findet im Gegensatz zum Absturz weitgehend auf der Rampe selbst statt, weshalb nicht zwingend ein Wechselsprung ausgebildet wird. (DIN19661-2, 2000-09)

Ob eine Rampe oder eine Gleite zur Sohlensicherung gebaut wird, hängt vor allem von der morphologischen Charakteristik des Gewässers ab. Bei größeren Sohlengefällen können ebenfalls künstliche Sohlenstufen in Form von Rampen sinnvoll sein. Ist das Gefälle sehr flach, kommen eher flachgeneigte Sohlengleiten mit wenig Rauigkeitselementen zum Einsatz. (Hütte, 2000)

Eine Sohlengleite ist im Bau „teurer als die klassische Form der Sohlenrampe, ist aber ökologisch günstiger zu bewerten“ (Lange, 1993).

Häufig wird bei Rampen zusätzlich zwischen rau und glatt unterschieden. Petschallies definiert die glatte Rampe als eine zwischen 1:4 und 1:9 geneigte Schussrinne (Petschallies, 1989). Knauss (1979) hat die wesentlichen Unterschiede zwischen glatten und rauen Rampen zusammengefasst. Er betrachtet die unterschiedliche Konstruktion sowie Vor- und Nachteile der beiden Sohlenbauwerksarten (Tabelle 3). Aufgrund der vielen Nachteile glatter Sohlenrampen gegenüber den rauen Bauwerken sind diese heute nicht mehr zu empfehlen, weshalb diese Bauweise auch nicht mehr in der DIN 19661-2 für Sohlenbauwerke zu finden ist. Dennoch können Bauwerke dieser Form in den Gewässern vorkommen. Sie werden allerdings wegen ihrer schlechten ökologischen Durchgängigkeit häufig umgewandelt in raue Sohlenrampen. Ein Beispiel für eine solche Umwandlung ist die Rampe am Hegbach, das im Anhang 2 zu finden ist.

Tabelle 3: Vergleich der glatten und rauen Rampe (nach Lange, 1993, Knauss, 1979)

Kriterien	Glatte Rampe	Raue Rampe
Neigung	1:4 bis 1:8	1:8 bis 1:15
Baustoffe	Beton, Holzverkleidung, Steinpflaster	Steinblöcke, Spundwände
Art des Energieentzugs	Am Fuß der Rampe durch Wechselsprung	Auf der Rampe durch erhöhte Reibung
Anwendbarkeit	Unbegrenzt	In kleinen und mittleren Flüssen
Bau	Relativ hohe Baukosten Erschwerte Bauausführung (Wasserhaltung)	Wirtschaftliche, kostengünstige Bauweise Einfache Bauausführung
Wartung und Unterhaltung	Nahezu wartungsfrei	Nicht wartungsfrei, aber leichte Unterhaltungsmöglichkeit
Ökologische Aspekte	Problematische Einbindung in Fluss und Landschaft Ökologische Durchgängigkeit nicht gegeben	Naturnahe Bauweise, gute landschaftliche Einbindung Sauerstoffeintrag durch Durchwirbelung des Wassers Gute ökologische Durchgängigkeit

Im Folgenden soll auf unterschiedliche Konstruktionsweisen von rauen Sohlenrampen und -gleiten näher eingegangen werden. Zuerst wird die klassische Bauweise erläutert, danach folgt die naturnahe Konstruktion. Ebenfalls wird die Bauweise der V-Rampe beschrieben, die als konstruktive Alternative zur klassischen Bauweise angewendet werden kann.

Im Anhang 2 finden sich Praxisbeispiele zu verschiedenen Rampen und Gleiten.

4.2.1. Die klassische Bauweise

Bei der klassischen Bauweise ist die Rampe oder Gleite aus Steinen geformt, die auf eine Filterschicht oder eine Betonschicht gesetzt sind (Abbildung 6). Werden die Steine auf Beton gesetzt, müssen diese bis auf eine Höhe von $2/3$ mit Beton vergossen werden, damit die Rampe stabil ist (Petschallies, 1989). Zusätzlich zu den Steinen werden Spundwände und Pfahlreihen am Anfang und am Fuß der Rampe eingebaut. Am Rampenfuß befestigen kleinere Steine die Sohle, um die Erosion durch einen etwaigen Wechselsprung zu verhindern.

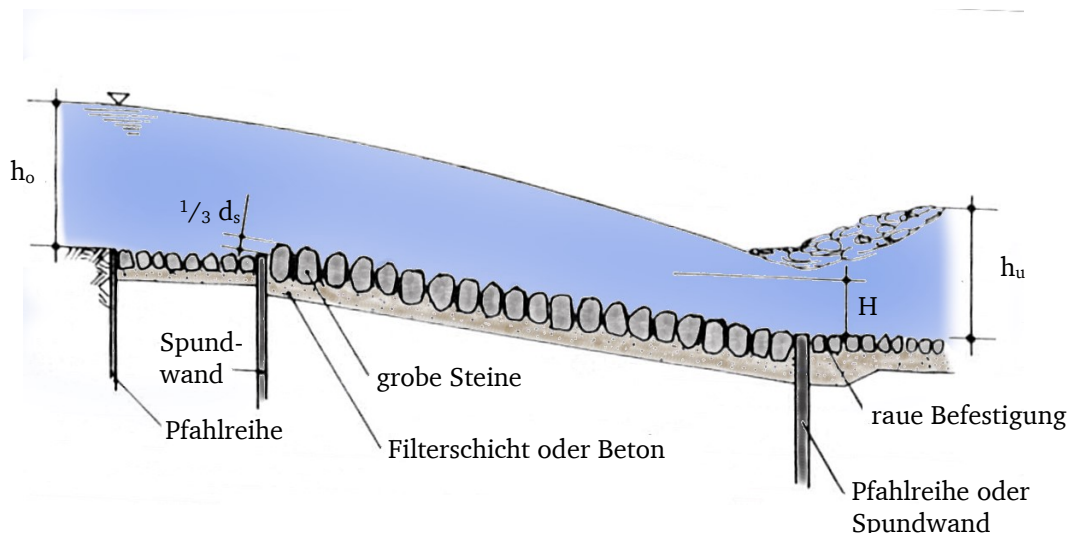


Abbildung 6: Aufbau einer Rampe in klassischer Bauweise (nach Petschallies, 1989)

Der Querschnitt der Rampe kann leicht gekrümmt gebaut werden, sodass es zu einer Abflusskonzentration in der Mitte der Rampe kommt und auch kleinere Abflüsse mit einer guten Wasserhöhe abfließen können (Petschallies, 1989).

Rampen dieser Bauweise sind bei mäßiger Höhe, Gefälle und Fließgeschwindigkeit ökologisch zumeist gut durchgängig. Durch eine fest betonierte Unterschicht wird allerdings der Austausch zwischen Fluss und Grundwasser unterbrochen. Zudem kommt es durch die Spundwände zu Veränderungen in den unterirdischen Wasserströmen. (Hütte, 2000)

4.2.2. Die naturnahe Bauweise

Die naturnahe Bauweise verzichtet im Gegensatz zur klassischen vollkommen auf Beton und setzt verstärkt auf Natursteine. Vorteile hierbei liegen in den geringeren Baukosten gegenüber Beton, der guten landschaftlichen Einbindung sowie der Bereicherung des Lebensraumes für strömungsliebende Arten und der Steigerung des Selbstreinigungsvermögens des Gewässers durch Sauerstoffeintrag (Gebler, 1991).

Bauwerke dieser Art können nach zwei unterschiedlichen Prinzipien konstruiert werden, nach der Schüttsteinbauweise oder der Setzsteinbauweise, auch lockere Bauweise genannt (Abbildung 7).

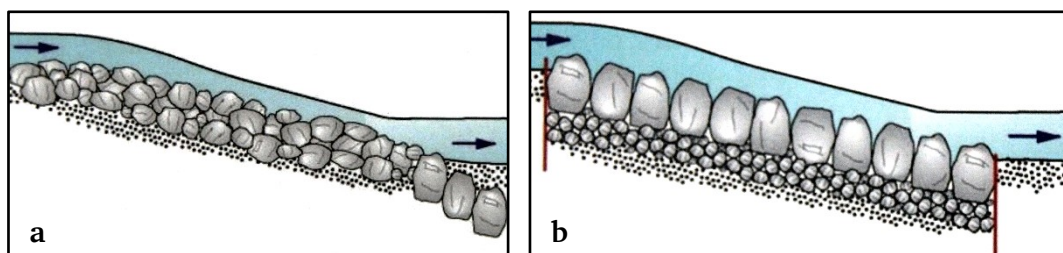


Abbildung 7: Aufbau einer Sohlenrampe **a** Schüttsteinbauweise, **b** Setzsteinbauweise (Gebler, 2009)

Die Schüttsteinbauweise ist aus mehrlagigen „lose“ in das Gewässer eingebetteten Steinen aufgebaut, worunter ist ein Unterbau in Filteraufbau aus Schotter ist. Nach Gebler (2009) sind Querriegel aus Spundwänden, wie sie in der klassischen Bauweise häufig Verwendung finden, nicht zu empfehlen, da diese nicht der natürlichen Umlagerung der Steine folgen und sich so aus Rampen mit der Zeit Abstürze formen können. Vorteile der Schüttsteinbauweise sind die Elastizität des Bauwerks, die kostengünstige Herstellung und die einfache Sanierung.

Gegenüber der lockeren Bauweise besteht die Setzsteinbauweise aus geschichteten Blocksteinen, die „hochkant eng aneinandergesetzt werden“ (Gebler, 2009), was der österreichischen Bauart von Blocksteinrampen entspricht. Darunter ist ein Filterunterbau, der „sowohl aus einer Filtermatte mit einer Schotterauflage als auch aus einem evtl. mehrschichtigen, abgestuften Kiesfilter“ (Gebler, 2009) bestehen kann. Diese Bauweise ist höher belastbar als die Schüttsteinbauweise, da die Blocksteine eine Verbundwirkung besitzen, was allerdings in der Praxis in den seltensten Fällen erforderlich ist (Gebler, 2009). Diese Bauweise ist kostenintensiver als ihr Pendant.

In der Praxis werden beide Bauweisen häufig gemischt, um eine abwechslungsreichere Struktur der Rampe zu erhalten. Durch Platzieren einzelner Störsteine in die Rampe werden verschiedene Strömungsbereiche geschaffen, was zusätzlich Ruhezonen für Fische schafft. (Gebler, 2009)

Zur Ausgestaltung der Rampen können verschiedene Strukturmuster angewendet werden (Abbildung 8). Diese reichen vom Setzen einzelner Störsteinreihen bis hin zu einer aufgelösten Rampenstruktur. Gebler empfiehlt eine „Gestaltung in Beckenstruktur“ (2009), bei der folgende Punkte zu beachten sind:

- „Integration einer Niedrigwasserrinne in Beckenstruktur
- Ausführung im Profil mit ansteigender Sohle zu den Ufern hin
- Gestaltung der Randbereiche in gleichmäßiger Struktur [...]
- Zusätzliche Einbindung von Störsteinen in diese Randbereiche
- Anordnung von Steinspornen am Ufer (kurze Bühnen) [...]“ (Gebler, 2009)

Bei kleinen Bächen kann ebenfalls eine Rampe oder Gleite mit eher gleichmäßiger Rauheit effektiv sein (Gebler, 2009).

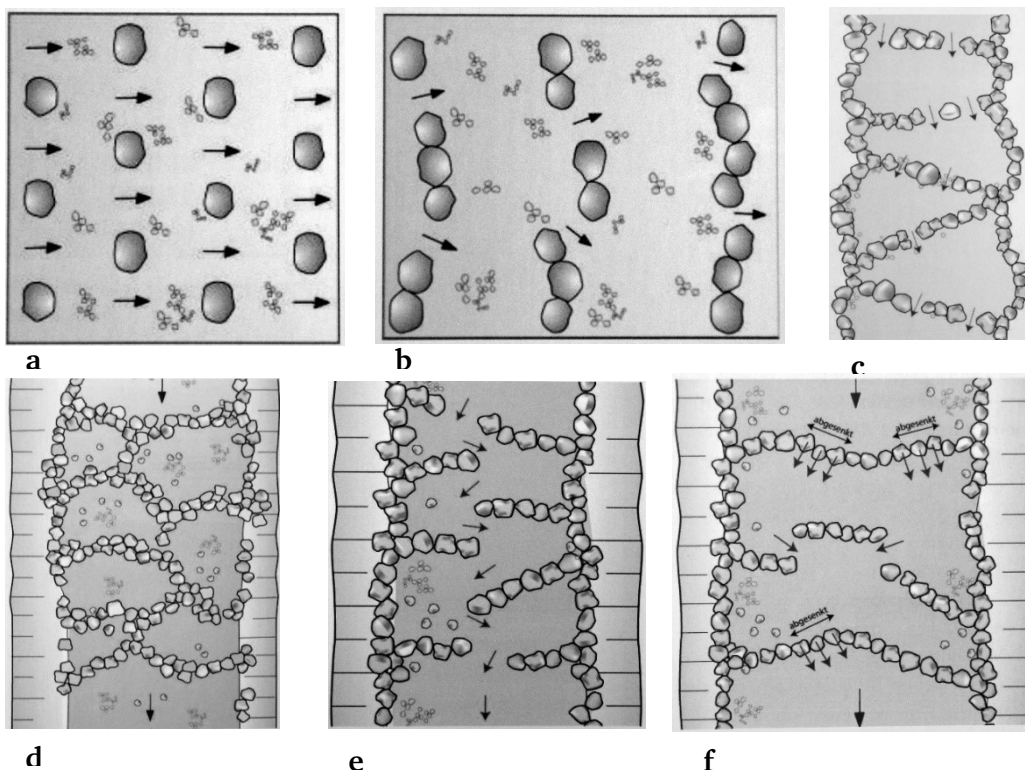


Abbildung 8: Ausbildungsformen von Rampen und Gleiten **a** einzelne Störsteine, **b** Beckenstruktur, **c** Rautenstruktur, **d** aufgelöste Gitterstruktur, **e** Pendelstruktur, **f** einzelne Schwellen (nach Gebler, 2009)

4.2.3. V-Rampen

Die V-Rampe ist eine Alternative zur herkömmlichen rauen Rampe, die an der Technischen Universität München entwickelt wurde. Allerdings wurde dieser Rampentyp bisher nur an mittleren und großen Gewässern betrachtet (Niedermayr, 2008).

Im Gegensatz zu einer Rampe mit durchgehendem Gefälle besteht diese V-Rampe aus Seitenstrukturen, die wie Schwellen angebracht sind (Abbildung 9). Diese engen den Abflussquerschnitt lokal ein, sodass die Abflusshöhe angehoben und die Fließgeschwindigkeit verringert wird, was zu einer geringeren Sohlenbelastung führt. Somit ist meist kein Höhenversatz der Gewässersohle notwendig (Niedermayr, 2008).

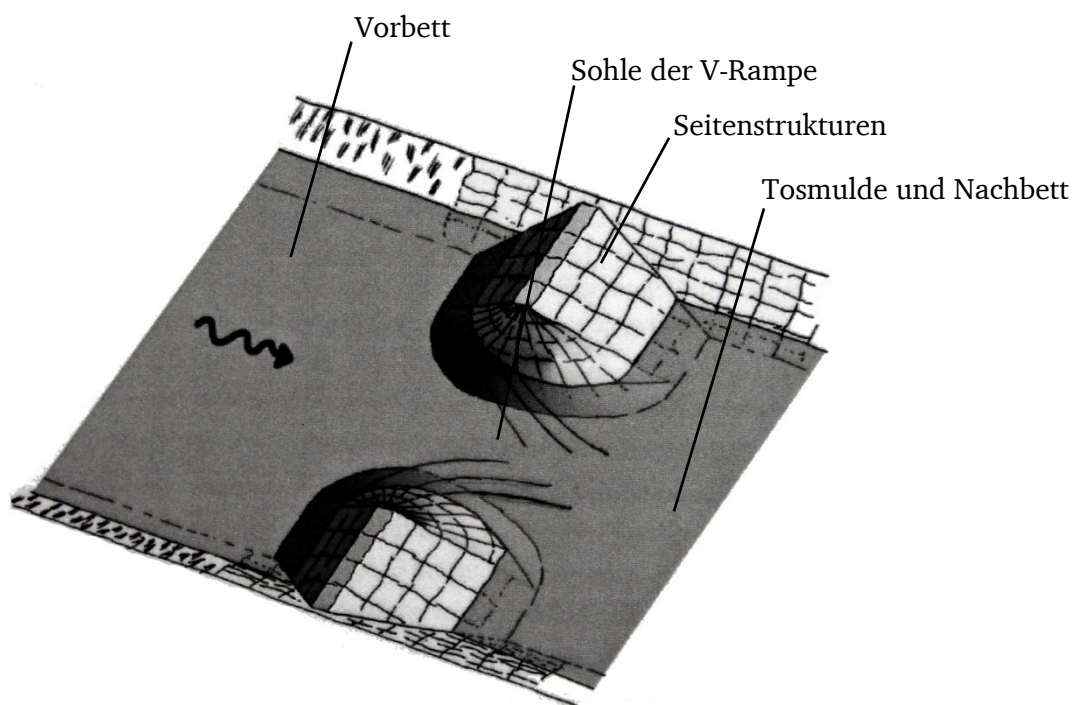


Abbildung 9: Aufbau einer V-Rampe (nach Niedermayr, 2008)

Wesentliche Charakteristik dieser Rampe ist die vollkommene Öffnung in der Mitte der Seitenstrukturen. Somit kann bei geringen und mittleren Abflüssen das Wasser fast ungehindert zwischen der Rampe hindurchfließen, sodass der Oberwasserspiegel nur geringfügig beeinflusst wird. Dies führt zu einer veränderten Aufstaucharakteristik, die Niedermayr mit anderen Rampen verglichen hat (Abbildung 10).

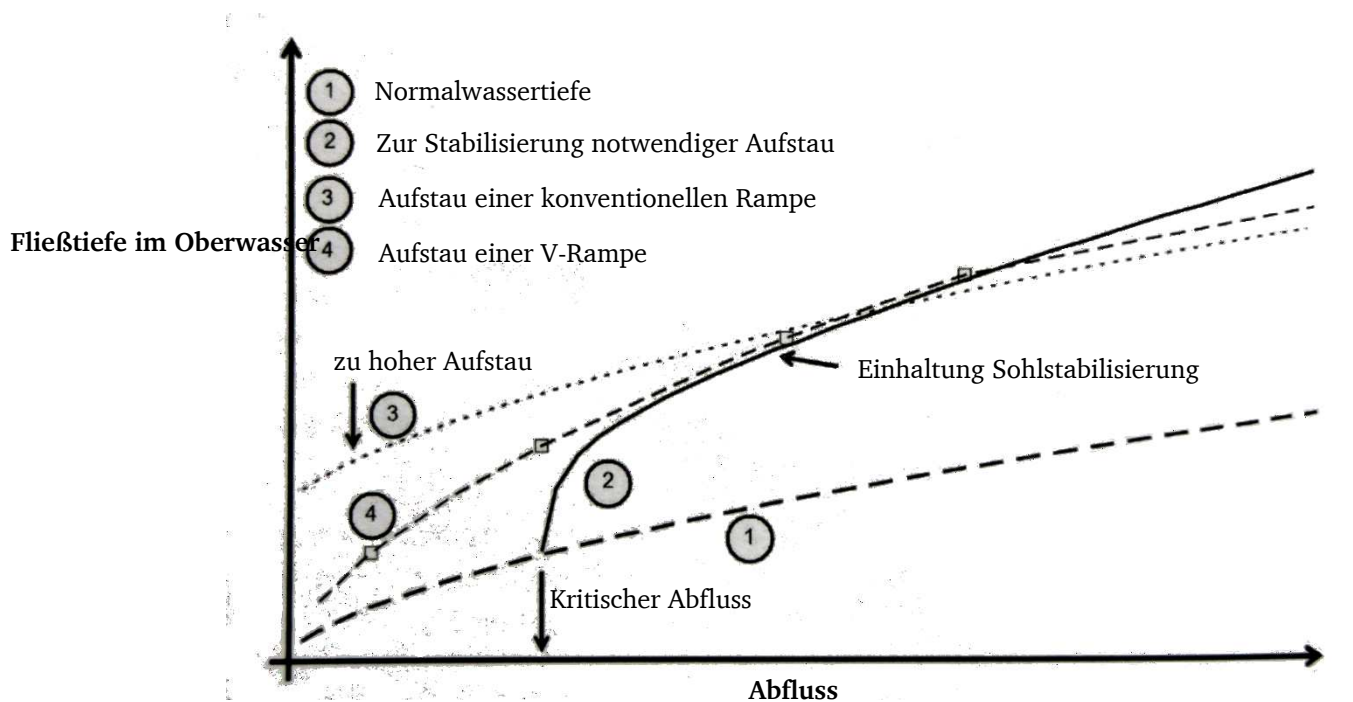


Abbildung 10: Vergleich der Aufstaucharakteristik von Rampen (nach Niedermayr, 2008)

Im Gegensatz zu anderen Rampen wird bei geringeren Abflüssen die Fließcharakteristik weniger stark negativ beeinflusst. Dagegen wird bei höheren Abflüssen der Aufstau, der zur Sohlstabilisierung notwendig ist, dank der Seitenstrukturen trotzdem eingehalten und liegt sogar über der Wirkung von rauen Rampen.

Die Konstruktion solcher V-Rampen kann in verschiedenen Formen der Seitenstruktur erfolgen (Abbildung 11), die von trapezförmig bis zu gut abgerundet reichen.

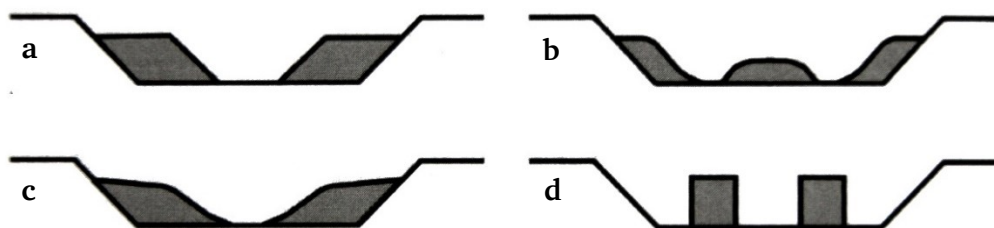


Abbildung 11: Formen der Seitenstrukturen einer V-Rampe (nach Niedermayr, 2008)

Die Seitenstrukturen können aus verschiedensten Baumaterialien, wie Wasserbausteine, Betonverbundsteine, Natursteine oder Gabionen aufgebaut werden. Zusätzlich können gesetzte Deckwerke mit Pfählen verstärkt werden. (Niedermayr, 2008)

Neben der besseren Aufstaucharakteristik ist die V-Rampe ebenfalls ökologisch wertvoll. Die Durchgängigkeit ist für die meisten Wasserorganismen und Fische gegeben. Daneben wird Sauerstoff in das Gewässer eingetragen und an den Seitenstrukturen entstehen strömungsarme Bereiche, die für viele Lebewesen als Rückzugsraum genutzt werden können. (Niedermayr, 2008)

4.3. Grund- und Sohlenschwellen

Nachdem verschiedene Bauweisen der Sohlenstufen betrachtet wurden, soll nun auf die Schwellen näher eingegangen werden. In diesem Kapitel werden im Besonderen die Grund- und Sohlenschwellen betrachtet, im darauffolgenden Abschnitt dann die Stützwellen. Im Anhang 3 finden sich Beispiele zu verschiedenen Schwellenarten.

Die Schwellentypen in diesem Kapitel ragen nur wenig über die Sohle hinaus (Grundschwellen) oder schließen bündig mit der Sohle ab (Sohlenschwellen) (DIN19661-2, 2000-09). Allerdings sind die beiden Arten nicht immer eindeutig zu trennen (Patt et al., 2011). Folgen mehrere Schwellen hintereinander, spricht man von einem Traversensystem (Patt und Gonsowski, 2011) (Abbildung 12). Ein Fließwechsel tritt anders als bei Abstürzen nur bei geringen Abflüssen auf (Gebler, 1991).

Nach einer gewissen Zeit können Sohlenschwellen durch Auswaschung des Gewässerbetts ober- und unterstrom zu Grundschwellen geformt werden. Sammelt sich wiederum Geschiebe oberhalb einer Grundschwelle an, wird diese zu einem Absturz. (DIN19661-2, 2000-09)

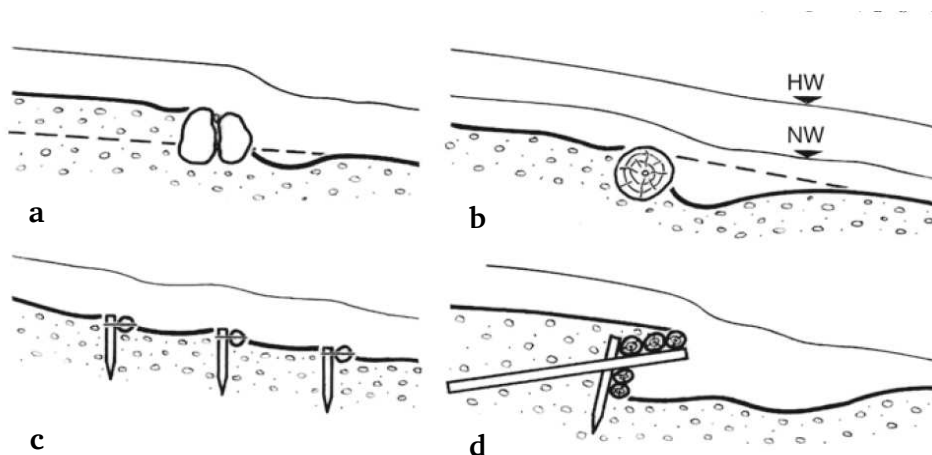


Abbildung 12: Verschiedene Bauweisen von Sohlen- und Grundschwellen **a** Steinschwelle, **b** Rundholzwelle, **c** Traversensystem, **d** Schwelle mit Fischrefugium (nach Patt und Gonsowski, 2011)

Der Einsatz von Grund- und Sohlenschwellen ist häufig damit begründet, dass Schwellen die Sohle lokal fixieren, dem Wasser Fließenergie entziehen und zwischen den Schwellen das Sohlengefälle verringern, was insgesamt zu einer Stabilisierung der Gewässersohle führt (Gebler, 1991). Ebenfalls werden Schwellen zur Niedrigwassererhöhung bei geringen Gefällen und zur Stärkung von Böschungssicherungen genutzt (DIN19661-2, 2000-

09). Zusätzlich können durch Schwellen Fischrefugien und Rückzugsräume vor Raubvögeln und Sonneneinstrahlung geschaffen werden (Patt und Gonsowski, 2011).

Zum Bau solcher Schwellen werden „querliegende, in die beiden Böschungen eingebundene Rundhölzer oder Blockreihen verwendet“ (Patt und Gonsowski, 2011). Ebenfalls können Betonfertigteile eingesetzt werden (Schroeder und Römisch, 2001). In Abbildung 12 sind verschiedene Bauweisen von Schwellen dargestellt. Die Schwellenhöhe sollte generell 10-20 cm nicht überschreiten, um eine ökologische Durchgängigkeit zu gewährleisten (Patt et al., 2011).

Nach Gebler haben sich Holzschwellen in der Praxis nicht bewährt, da diese anfällig für Erosion sind, durch die das Bauwerk angegriffen wird und sich Auskolkungen bilden (2009).

Effektiver sind Steinschwellen aus großen Natursteinblöcken, die in die Böschung eingebunden sind. Des Weiteren sorgen eine geschwungene Linienführung und eine aufgelockerte Gestaltung für eine bessere Ästhetik. Es sollten genügend große Lücken zwischen den Steinen sein, sodass Fische die Schwellen passieren können. (Abbildung 13).

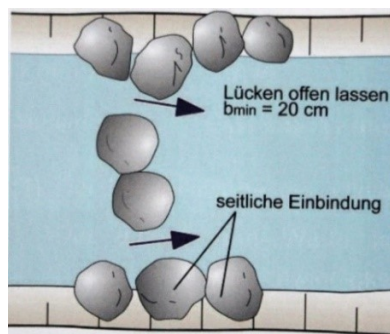


Abbildung 13: Schema einer Steinschwelle aus Natursteinblöcken (Gebler, 2009)

Eine weitere Möglichkeit der Gestaltung von Schwellen mit Steinen ist das Setzen von Pfahlreihen, auf die eine Steinschüttung folgt (Abbildung 14).

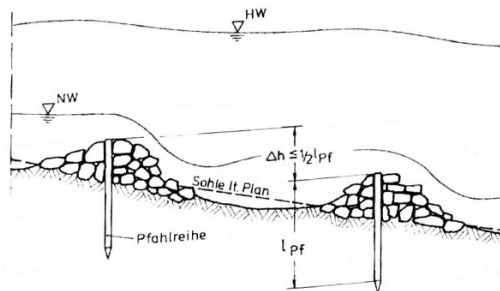


Abbildung 14: Grundschwellen aus Pfahlreihe und Schüttsteinen (Schroeder und Römisch, 2001)

4.4. Stützswellen und kleine Stauanlagen

Eine weitere Form der Schwellen neben den Grund- und Sohlenschwellen ist die Stützschwelle, die auch Stützwehr genannt wird. Dieser zweite Name lässt schon darauf schließen, dass diese Bauform mit Wehren und kleineren Stauanlagen eng gekoppelt ist. Tatsächlich kann die konstruktive Ausbildung mit der fester Wehre gleichgesetzt werden (DIN19661-2, 2000-09).

Stützswellen ragen im Gegensatz zu anderen Schwellen so hoch über die Sohle hinaus, dass ein Fließwechsel eintritt, womit sie in der hydraulischen Wirksamkeit Wehren oder Abstürzen gleichen (DIN19661-2, 2000-09). Durch die feste Wehrform kann allerdings der Wasserstand nicht individuell geregelt werden, sondern er stellt sich aufgrund des jeweilig herrschenden Abflusses ein (Strobl und Zunic, 2006).

Für die Konstruktion von Stützwehren können entweder runde, hohe Formen oder eher breite, flachere verwendet werden. Somit gehören sie nach der Einteilung von Peter zu den rundkronigen und breitkronigen Wehren (2005).

Ebenfalls lassen sich Wehre nach ihrer Anströmungsart unterscheiden, je nachdem, ob sie rechtwinklig oder schräg angeströmt werden (Abbildung 15). Welche der beiden Formen der Anströmung eingesetzt wird, hängt vom jeweiligen Gewässer und der Lage des Bauwerks im Gewässer ab. Bei einer schrägen Anströmung vergrößert sich die angeströmte Fläche, allerdings gibt es eine verstärkte Kolkbildung auf der Seite, auf die die Strömung verstärkt zuläuft, wie in der Abbildung 15 im Bild b am linksseitigen Ufer zu sehen ist.

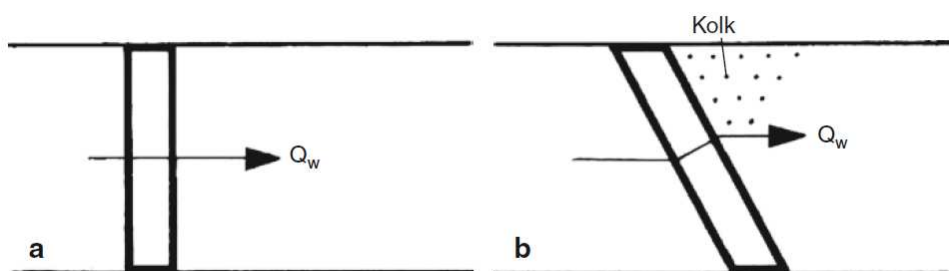


Abbildung 15: Schema der Anströmung **a** eines rechtwinkligen, **b** eines schrägen Wehres (Patt und Gonsowski, 2011)

In Abbildung 16 ist der allgemeine Aufbau eines festen Wehres, also ebenfalls der einer Stützschwelle dargestellt. Wesentlicher Bestandteil ist das Wehr selbst mit Schwelle und Rücken, an das sich ein Tosbecken anschließt, um eine Kolkbildung zu verhindern und

den Wechsprung zu fixieren. Nach dem Tosbecken folgt eine weitere befestigte Strecke als Kolk-schutz. Häufig wird ein Dichtungsschirm unterhalb des Wehrrückens verbaut, um das Bauwerk standsicherer zu machen.

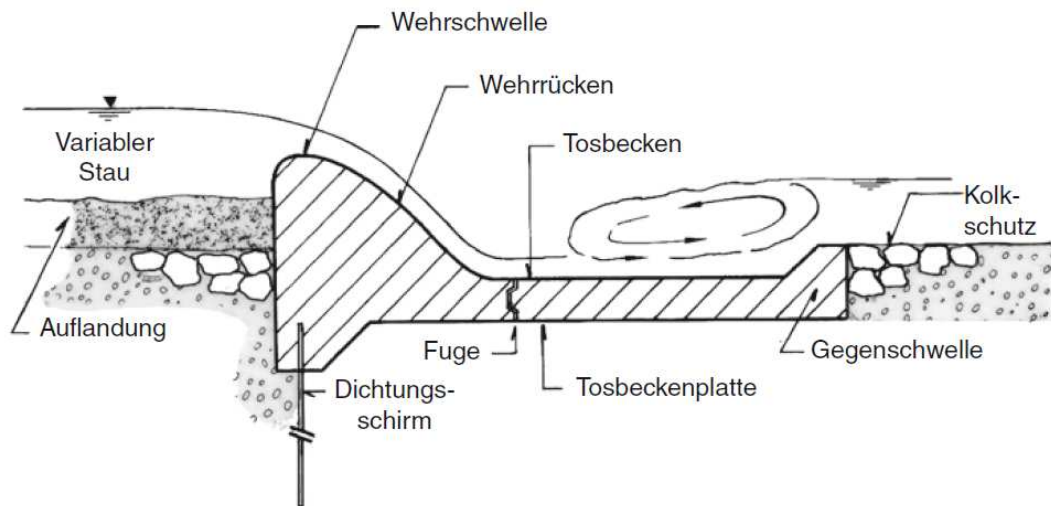
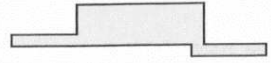
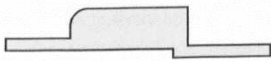

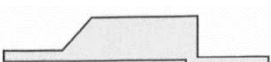

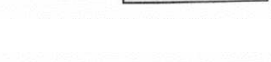


Abbildung 16: Aufbau eines festen Wehres/Stützschwelle (Patt und Gonsowski, 2011)

Derartige Stützwehre werden zumeist aus Beton konstruiert, seltener aus Mauerwerk. Eventuell ist ein weiterer Abrasionsschutz in Form von qualitativ hochwertigerem Beton als der des übrigen Bauwerkes, mit Hartzuschlagsstoffen oder einer Verkleidung aus Stein, Stahl, Keramik oder Holz, nötig. (Patt und Gonsowski, 2011)

Des Weiteren gibt es verschiedene Möglichkeiten, die Überfallkrone eines Wehres auszubilden, je nachdem, ob die gesamte Wehrform eher breit oder schmal ist (Tabelle 4).

Tabelle 4: Mögliche Wehrrückenformen (nach Peter, 2005)

Skizze	Beschreibung
	breitkronig scharfkantig
	breitkronig angerundet
	breitkronig angefast
	breitkronig angeschrägt
	rundkronig halbkreisförmig
	rundkronig mit Ausrundungsradius und Schussrücken

Ist ein Stützwehr länger in Betrieb und hat der Fluss einen hohen Feststofftransport, können sich Anlandungen an der Vorderseite der Schwelle bilden, sodass sie sich mit der Zeit zu einem Absturz formt (DIN19661-2, 2000-09). Dies muss schon bei der Konstruktion und der Bemessung berücksichtigt werden.

Neben der Sohlsicherung erfüllen Wehre und Stützschnellen häufig weitere Aufgaben, wie das Stauen des Wassers für ein Wasserkraftwerk zur Energiegewinnung. Allerdings haben sie einen ähnlich negativen Effekt wie Abstürze auf die Durchgängigkeit des Gewässers, sodass der Einsatz gut abzuwägen ist.

5. Bemessungsansätze für Sohlenbauwerke

Im folgenden Kapitel werden verschiedene Bemessungsansätze für die jeweiligen Sohlenbauwerke aufgezeigt. Je nach Bauwerkstyp gibt es unterschiedliche Ansätze für die Konstruktion und die hydraulische Berechnung. Hierbei spielt sowohl die Charakteristik des Bauwerks als auch die Eigenschaften des Fließgewässers und das Ökosystem eine Rolle. Zuerst werden generelle Bestimmungen und der Ablauf einer Bemessung beschrieben, worauf auf einzelne Bauweisen eingegangen wird. Ebenfalls wird die ökologische Komponente betrachtet.

5.1. Allgemeine Bemessungsgrundsätze und Bemessungsabfluss

Die Konstruktion von Sohlenbauwerken wird maßgeblich von den Eigenschaften des Gerinnes und den vorherrschenden Abflussbedingungen beeinflusst. So ist das Sohlengefälle bei der Wahl und Bemessung des Bauwerks von Relevanz. Hierbei gibt es verschiedene Berechnungsarten.

Eine Möglichkeit zur Gewinnung des Sohlengefälles ist der Vergleich der auszubauenden Strecke mit einer Musterstrecke, die in Neigung, Zustand, Beschaffenheit, Querschnitt und Abfluss übereinstimmt. So kann das Gefälle der Musterstrecke auf den betrachteten Gewässerabschnitt übertragen werden. (DIN19661-2, 2000-09)

Daneben kann das Sohlengefälle auch rechnerisch durch folgende Gleichung ermittelt werden (DIN19661-2, 2000-09):

$$I_{zul} = \frac{\tau_0}{\rho \cdot g \cdot h} \quad (1)$$

mit

I_{zul}	= zulässiges Sohlengefälle	[-]
τ_0	= Grenzscherpspannung	[N/m ²]
ρ	= Dichte des Wassers	[kg/m ³]
h	= Wasserhöhe	[m]

Die Formel ist aus der Formel für die Grenzscherpspannung τ_0 abgeleitet. Die Spannung kann entweder durch Einordnung der Sohlenbeschaffenheit in einer Tabelle geschätzt werden oder durch die Ermittlung der Bodenkennwerte, nämlich der mittleren Korngröße

und der Porenzahl. Anhand dieser Kennwerte kann in Diagrammen die Grenzschleppspannung abgelesen werden. Sowohl die Tabelle als auch die Diagramme können im Anhang 5 nachgeschlagen werden. (DIN19661-2, 2000-09)

Mithilfe des zulässigen Sohlengefälles wird zuerst die Art des Sohlenausbaus festgelegt. Die DIN19661-2 (2000-09) gibt hierbei folgende Richtwerte in Abhängigkeit vom mittleren Sohlengefälle vor dem Ausbau I_m vor :

- $I_m > 0,8\%$ durchgehende Sohlenbefestigung
- $0,8\% \geq I_m \geq 0,3\%$ Sohlenbefestigung oder Sohlenbauwerk
- $0,3\% > I_m \geq I_{zul}$ Sohlenbauwerke

Somit ist auch das Sohlengefälle nach dem Ausbau I_a festgelegt, da es kleiner gleich dem zulässigen Sohlengefälle sein muss:

$$I_a \leq I_{zul} \quad (2)$$

Neben dem Sohlengefälle sollte bei der Wahl und dem Ausbau von Sohlenbauwerken ebenfalls auf die ökologische Durchgängigkeit, den Eingriff in das Fließgewässersystem und die Einfügung in das Landschaftsbild geachtet werden.

Eine zweite wichtige Größe neben dem Gefälle ist der Abfluss und die damit verbundenen Wasserspiegelhöhen. Es wird unterschieden zwischen dem Bemessungsabfluss und dem Betriebsabfluss. Ersterer ist der Abfluss bei einem Hochwasserereignis, für den das Bauwerk standsicher sein muss. Letzterer ist der Abfluss, der an den meisten Tagen im Jahr auftritt und für den das Bauwerk funktionsfähig sein muss, die Wassertiefe und Fließgeschwindigkeit einhalten muss und die ökologischen Aspekte gesichert sind. Für diesen wird das Bauwerk konstruktiv bemessen. (Aberle und Kulisch, 2009b)

Diese Abflüsse können sowohl durch Abflussbeobachtungen direkt am Gewässerabschnitt oder an einer Vergleichsstrecke als auch durch Niederschlag-Abfluss-Modelle ermittelt werden. (DIN19661-2, 2000-09)

Ebenfalls lässt sich der Abfluss oder das Sohlengefälle bei bekannter Gerinnegeometrie durch allgemeine Fließformeln berechnen.

Durch das Kontinuitätsgesetz lassen sich Abflüsse in Abhängigkeit der Fließgeschwindigkeit und der Querschnittsfläche ausdrücken:

$$Q = v \cdot A \quad (3)$$

mit

Q	= Abfluss	[m ³ /s]
v	= Fließgeschwindigkeit	[m/s]
A	= Querschnittsfläche	[m ²]

Mithilfe verschiedener Ansätze kann die Fließgeschwindigkeit eines Gewässerabschnitts ermittelt werden.

Die „[i]m europäischen Raum und den USA (...) am häufigsten verwendete Formel“ (Patt et al., 2011) ist die nach Gaukler, Manning und Strickler:

$$v = k_{st} \cdot \sqrt{I_s} \cdot r_{hy} \quad (4)$$

mit

k _{st}	= Strickler-Beiwert	[m ^{1/3} /s]
I _s	= Sohlengefälle	[-]
r _{hy}	= hydraulischer Radius	[m]

Der Strickler-Beiwert richtet sich nach der Beschaffenheit der Gewässersohle und der Rauheit und kann in der Fachliteratur nachgeschlagen werden, eine Tabelle mit Werten ist ebenfalls im Anhang 6.

Für naturnahe Gewässer wird heute häufig die Methode nach Darcy-Weisbach empfohlen, da hier die Rauigkeit besser erfasst wird und schwierige Strömungsverhältnisse besser abgebildet werden (Strobl und Zunic, 2006, Patt et al., 2011).

$$v = \sqrt{\frac{1}{\lambda} \cdot 8 \cdot g \cdot r_{hy} \cdot I_s} \quad (5)$$

mit

λ	= Widerstandsbeiwert	[-]
g	= Fallbeschleunigung	[m/s]

Zur Bestimmung des Widerstandswertes λ können verschiedene Ansätze verwendet werden, z.B. der Ansatz nach Colebrook und White (Strobl und Zunic, 2006):

$$\sqrt{\frac{1}{\lambda}} = -2 \cdot \log\left(\frac{k_s}{r_{hy} \cdot 14,84}\right) \quad (6)$$

Hierbei kann die äquivalente Sandrauheit k_s wie auch der Strickler-Beiwert anhand von Tabellen nachgeschlagen werden (siehe Anhang 6). Ebenfalls besteht zwischen den beiden Beiwerten folgender Zusammenhang:

$$k_{st} = \frac{26}{\sqrt[6]{k_s}} \quad (7)$$

Der Bemessungsablauf, der in den folgenden Kapiteln für die verschiedenen Sohlenbauwerkstypen beschrieben werden soll, kann allgemein in vier Schritte unterteilt werden (Abbildung 17).

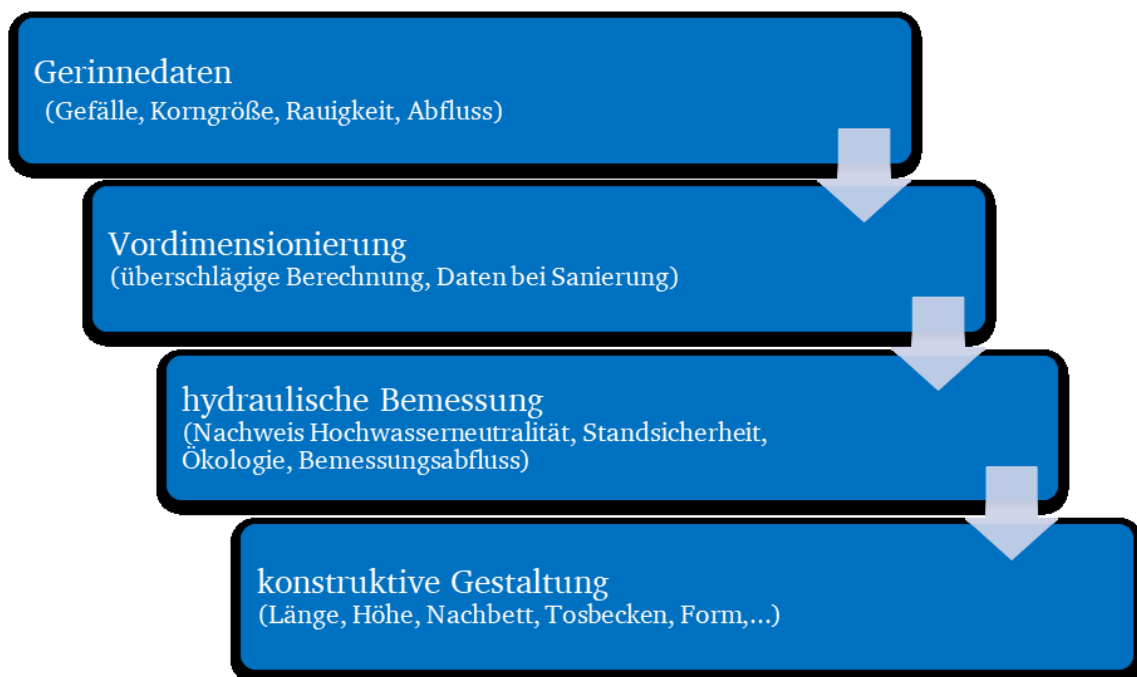


Abbildung 17: Schritte bei der Bemessung von Sohlenbauwerken (LUBW, 2007)

Zunächst müssen die Gerinnedaten für den Gewässerabschnitt ermittelt werden, nämlich die Gerinnebreite, die Korngröße und die Rauigkeitsbeiwerte, das Sohlengefälle und die

Abflüsse. Anhand dieser Daten kann dann eine Vordimensionierung des Bauwerks stattfinden, sofern das Bauwerk nicht lediglich umgebaut werden soll. Die Daten der Vordimensionierung müssen dann der hydraulischen Prüfung auf Standsicherheit bei Bemessungshochwasserabfluss standhalten. Ebenfalls wird in diesem Schritt die ökologische Durchgängigkeit geprüft und der genaue Bemessungsabfluss für die Bauwerkselemente festgelegt. Gegebenenfalls kann die hydraulische Bemessung mit der Vordimensionierung gleichzeitig erfolgen. Zuletzt wird das Bauwerk konstruktiv ausgestaltet, was je nach Bauwerkstyp die Bemessung verschiedener Elemente wie Absturzhöhe, Rampenlänge, Kronen- und Überfallform usw. beinhaltet. Diese Schritte sind ein iterativer Prozess, sodass eventuell verschiedene Schritte so oft wiederholt werden müssen, bis das Ergebnis den Anforderungen genügt.

5.2. Hydraulische Wirksamkeit und Fließzustände

Die Fließart eines Gewässers ist ein maßgebender Faktor bei der Bemessung von Sohlenbauwerken. Gewisse Fließzustände vor und hinter dem Bauwerk müssen gewährleistet sein, sodass das Bauwerk seine Funktion erfüllt und keine übermäßige Erosion auftritt.

Anhand der dimensionslosen Froude-Zahl Fr kann die Fließart bestimmt werden. Man unterscheidet zwischen Schießen ($Fr > 1$) und Strömen ($Fr < 1$). Bei $Fr = 1$ tritt der Fließwechsel ein und die Grenztiefe h_{gr} des Wasserstandes wird ausgebildet.

$$Fr = \frac{v}{\sqrt{g \cdot h}} \quad (8)$$

Durch die Unterscheidung in Schießen und Strömen ergeben sich verschiedene mögliche Fließzustände an Sohlenbauwerken (Tabelle 5), die abhängig von der jeweiligen Fließart des Ober- und Unterwassers sind. Hierbei sollte in beiden Bereichen Strömen vorherrschen (DIN19661-2, 2000-09). Je nach Fließzustand treten auf dem Bauwerk Fließwechsel auf.

Tabelle 5: Fließzustände an Sohlenstufen (nach DIN19661-2, 2000-09)

			Oberwasser		
			$Fr < 1$ 0	$Fr = 1$ 1	$Fr > 1$ 2
Unterwasser	$Fr < 1$	0	Fall 0/0	Fall 1/0	Fall 2/0
	$Fr = 1$	1	Fall 0/1	Fall 1/1	Fall 2/1
	$Fr > 1$	2	Fall 0/2	Fall 1/2	Fall 2/2

Im Regelfall sollte das Bauwerk so bemessen werden, dass der Fall 1/0 auftritt, sodass ein zweifacher Fließwechsel mit Ausbildung eines Wechselsprungs mit gestauter Deckwalze auftritt (Abbildung 18). Dies ist gleichzeitig die Definition von hydraulischer Wirksamkeit, welche die DIN19661-2 (2000-09) gibt.

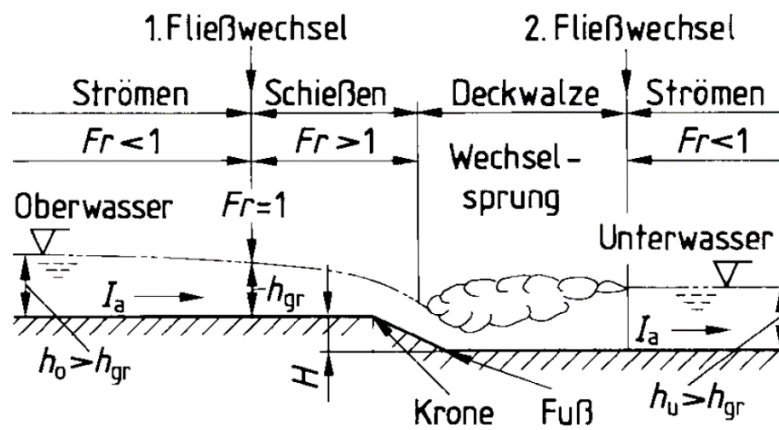


Abbildung 18: Abflussvorgang mit zweifachem Fließwechsel (nach DIN19661-2, 2000-09)

Der erste Fließwechsel tritt zu Beginn des Bauwerkes auf, wo das strömende Oberwasser die Grenztiefe erreicht. Über dem Bauwerk selbst schießt das Wasser mit $Fr > 1$. Am Fuß und Übergang zum Nachbett wird die Energie in Form eines Wechselsprungs umgewandelt. Hier tritt auch der zweite Fließwechsel auf, bei dem das Wasser aus dem Schießen durch die Deckwalze in strömendes Unterwasser übergeht.

Diese Definition der hydraulischen Wirksamkeit ist für Abstürze allgemein anerkannt, allerdings für Rampen und Gleiten umstritten. Hier wird die hydraulische Wirksamkeit unterschiedlich definiert.

Knauss definiert den Begriff als „größtmögliche[n] Entzug an Fließenergie mit kleinstmöglichem Aufwand“ (1979). Hierbei unterscheidet er zwischen hydraulisch wirksamen Abstürzen und wirksamen Rampen, bei denen ein gewellter Abfluss stattfindet. Letztere sollten seiner Meinung nach umbenannt werden, da diese Elemente der örtlichen Sohlenfixierung eher als Schwelle zu bezeichnen sind.

Whittaker und Jäggi fordern als Kriterium für hydraulische Wirksamkeit die vollständige Energieumwandlung über dem Bauwerk und damit zwei Fließwechsel. Sie stellen jedoch in Frage, ob Schwellen und Rampen immer hydraulisch wirksam sein müssen. (Whittaker und Jäggi, 1986)

Gebler geht in seiner Definition noch weiter und hält das Kriterium der hydraulischen Wirksamkeit für Rampen praxisfern. Er fordert lediglich die Umwandlung von Energie auf der Rampe und nimmt einen gewellten Abflusszustand in Kauf. (Gebler, 1991)

Diese unterschiedlichen Ansichten zur hydraulischen Wirksamkeit „zeigen die Wissenslücken in diesem Bereich und verdeutlichen die Notwendigkeit weiterer Forschung inklusive Naturmessungen“ (LUBW, 2007).

Ebenfalls ist weiter zu forschen, für welche Abflüsse dieses Kriterium der hydraulischen Wirksamkeit erfüllt sein muss. Abbildung 19 zeigt, dass je nach Größe des Abflusses unterschiedliche Fließvorgänge auf der Rampe stattfinden.

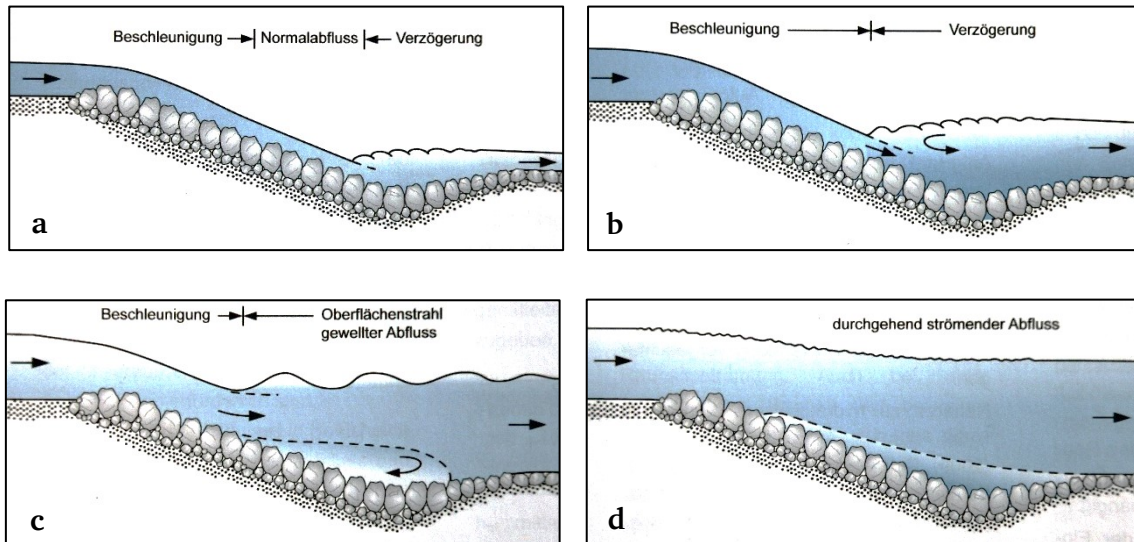


Abbildung 19: Abflussvorgang auf der Rampe bei verschiedenen Abflüssen (Gebler, 2009)

Bei nur geringen Abflüssen auf der Rampe kann in der Länge der Rampe der Normalabfluss und somit ein zweifacher Fließwechsel entstehen (a). Wird der Abfluss erhöht, wird das Unterwasser zusehends eingestaut, was zunächst zu einem fehlenden Normalabfluss auf der Rampe führt (b). Bei weiterer Erhöhung des Abflusses stellt sich nun gewellter Abfluss ein, es bildet sich keine Deckwalze mehr aus (c). Schließlich findet bei noch höheren Abflüssen kein Fließwechsel mehr statt, sondern es herrscht ein durchgehend strömender Abfluss (d). Je nachdem für welchen Abfluss nun die Rampe hydraulisch wirksam sein muss, folgen unterschiedliche Rampenhöhen, die sowohl zu einer Überdimensionierung als auch zu ökologisch negativen Auswirkungen führen können.

5.3. Bemessung von Absturzbauwerken

Bei der Bemessung von Absturzbauwerken wird, wie im vorigen Kapitel beschrieben, die hydraulische Wirksamkeit vorausgesetzt, die durch den zweifachen Fließwechsel und der Energieumwandlung in dem Wechselsprung herbeigeführt wird. Dies ist gewährleistet, wenn am Fuß der Deckwalze das Wasser schießend mit $Fr \geq 1,7$ ankommt und nach der Deckwalze mit $Fr \leq 0,5$ strömt (DIN19661-2, 2000-09).

Betrachtet man den Regelfall der Fließzustände 1/0 (Tabelle 5), so sind an dem Absturz vier verschiedene Abflusstypen möglich, die sich abhängig von der Absturzhöhe bei gleichbleibenden Wasserständen ausbilden (Abbildung 20). Durch die Bemessung der Abflusshöhe soll ein Abfluss nach c, ggf. auch nach b angestrebt werden.

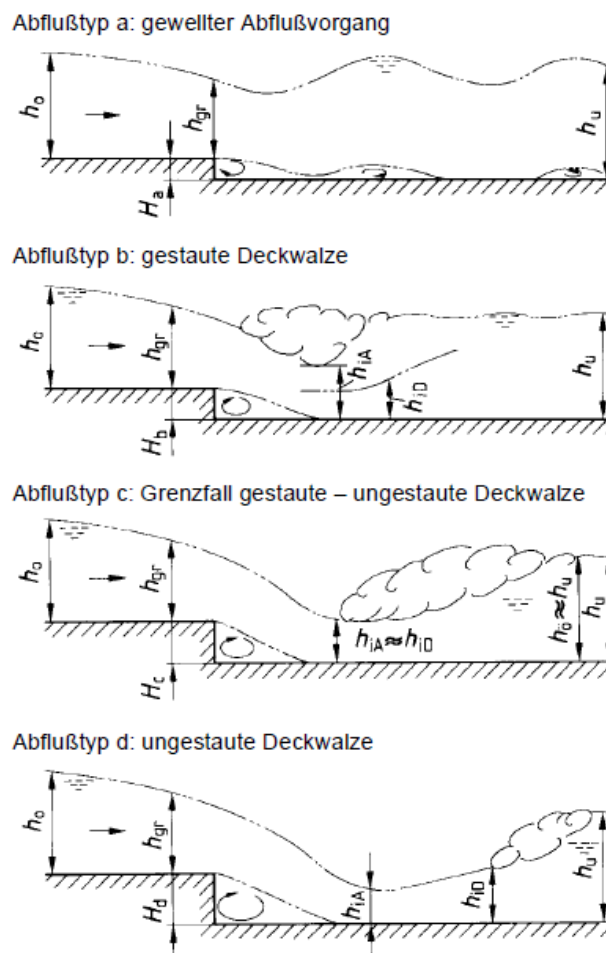


Abbildung 20: Abflusstypen bei einem Absturz (DIN19661-2, 2000-09)

Um diese Abflusstypen zu erreichen, wird die wirksame Absturzhöhe H_w berechnet, die mindestens erforderlich ist, damit der Absturz hydraulisch wirksam ist (DIN19661-2, 2000-09):

$$H_w \geq \left(0,15 + 1,1 \cdot \left[\left(Fr^{-\frac{4}{3}} + 2Fr^{\frac{2}{3}} - 2 \right)^{\frac{1}{2}} - 1 \right] \right) \cdot h_{gr} \cdot \beta_u^{\frac{2}{3}} \quad (9)$$

mit

H_w	= wirksame Absturzhöhe	[m]
Fr	= Froude-Zahl im Unterwasser	[-]
h_{gr}	= Grenztiefe des Fließgewässers oberstrom	[m]
β_u	= Einengungszahl um Unterwasser	[-]

Wenn der Gewässerabschnitt einen rechteckigen oder rechteckähnlichen Querschnitt besitzt und dazu eine geringe Querschnittsneigung mit einer Einengung,

$$\beta_o = \frac{b_o}{b_a} < 1,2; \quad \beta_u = \frac{b_u}{b_a} < 1,2 \quad (10,11)$$

mit

β_o	= Einengungszahl im Oberwasser	[-]
b_a	= Querschnittsbreite am Absturz	[m]
b_o	= Querschnittsbreite im Oberwasser	[m]
b_u	= Querschnittsbreite im Unterwasser	[m]

so entfällt der Term mit β_u und die Formel vereinfacht sich zu:

$$H_w \geq \left(0,15 + 1,1 \cdot \left[\left(Fr^{-\frac{4}{3}} + 2Fr^{\frac{2}{3}} - 2 \right)^{\frac{1}{2}} - 1 \right] \right) \cdot h_{gr} \quad (12)$$

Werden weitergehende Anforderungen an die Energieumwandlung gestellt, kann die Absturzhöhe $H > H_w$ gewählt werden, sodass andere Abflusstypen entstehen. Auf die dann folgende Bestimmung des Abflusstyps, wenn die Absturzhöhe nicht der wirksamen Absturzhöhe entspricht, wird hier nicht eingegangen. Angaben hierzu finden sich in der DIN19661-2 (2000-09).

Neben der Absturzhöhe ist die Länge der Befestigung vor und hinter dem Bauwerk zu berechnen. Hier ist die Sohle so auszubauen, dass sie vor Erosion geschützt ist.

Petschallies (1989) gibt hierfür überschlägige Formeln zur Bemessung beim Abflusstyp c an:

$$l_{ku} \geq 3 \cdot \sqrt{H \cdot h_{gr}} + 5,5 \cdot (h_{\bar{o}} - h_i) \quad (13)$$

$$l_{ko} \approx 3 \cdot h_o \quad (14)$$

mit

l_{ko}	= Befestigungslänge vor dem Absturz	[m]
l_{ku}	= Befestigungslänge nach dem Absturz	[m]
h_o	= Wassertiefe im Oberwasser	[m]
$h_{\bar{o}}$	= Wassertiefe am Ende der Deckwalze	[m]
h_i	= kleinste Wassertiefe vor der Deckwalze	[m]

Es wird angenommen, dass $h_i = 0$, da die Bemessung so einen Sicherheitszuschlag enthält. Ebenfalls kann für den Abflusstyp c $h_{\bar{o}}$ mit h_u gleichgesetzt werden (Abbildung 21).

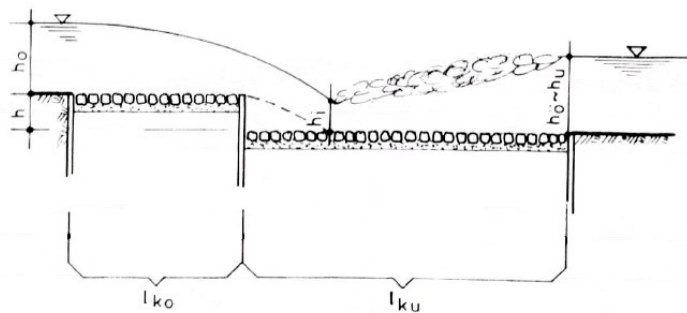


Abbildung 21: Befestigungslängen vor und hinter einem Absturz (nach Petschallies, 1989)

Eine Berechnung der Befestigungslängen nach DIN19661-2 (2000-09) ist im Anhang 7 dargestellt.

Bei anderen Abflusstypen kann es zweckmäßig sein, in das Sturzbett eine Endschwelle einzubauen bzw. das Sturzbett vertieft zu planen, um so die Befestigungsstrecke zu verringern. Nach Tabelle 6 ist dies bei dem hier betrachteten Abflusstyp c nicht nötig; eine Berechnung von Endschwellen ist in der DIN19661-2 (2000-09) zu finden.

Tabelle 6: Voraussetzungen für eine Endschwelle (DIN19661-2, 2000-09)

Fall	Abflusstyp	Δh	Endschwelle
$h_u > h_{\bar{o}}$	b	< 0	entfällt
$h_u = h_{\bar{o}}$	c	$= 0$	$= 0$
$h_u < h_{\bar{o}}$	d	> 0	> 0

5.4. Bemessung von Rampen und Gleiten

Anders als bei Abstürzen, die allein durch die hydraulischen Gegebenheiten im Gewässerabschnitt bemessen werden können, müssen bei Rampen und Gleiten Annahmen zur Geometrie des Bauwerks gemacht werden (Vordimensionierung), die dann durch Nachweise bestätigt werden bzw. iterativ anzupassen sind. So wird bei der Vordimensionierung die Höhe, die Neigung, die Breite und der Steindurchmesser als Schätzung festgelegt. Die Länge des Gleitbodens wird aus der Höhe der Sohlenstufe und dem Gefälle gefolgert (DIN19661-2, 2000-09).

Nach Abbildung 17 sind nach der Vordimensionierung zunächst die hydraulischen Parameter zu bemessen. Diese teilen sich auf in den Nachweis der Hochwasserneutralität bei Bemessungshochwasserabfluss, die Bestimmung des Bemessungsabflusses für die konstruktive Bemessung und die Prüfung von ökologischen Aspekten. Letzteres wird in Kapitel 5.7 erläutert.

Zunächst muss die Hochwasserneutralität des Bauwerks nachgewiesen werden. In der Berechnung unterscheidet man, ob hierbei ein durchgehend strömender Abfluss vorherrscht oder ein Fließwechsel an der Rampe eintritt. Tritt kein Fließwechsel auf, kann die Hochwasserneutralität durch eine Wasserspiegellagenberechnung mithilfe der Formel von Gaukler, Manning und Strickler bewiesen werden. Hierbei sind die Rauigkeiten auf der Rampe mit folgenden Formeln von Whittaker und Jäggi (1986) zu berechnen:

$$k_{stR} = \frac{21}{d_{65}^{\frac{1}{6}}} \text{ für Schüttsteinrampen} \quad (15)$$

$$k_{stR} = \frac{15,5}{d_{65}^{\frac{1}{6}}} \text{ für Setzsteinrampen} \quad (16)$$

$$d_{65} = \frac{d_s}{1.06} \quad (17)$$

mit

$k_{st,R}$	= Strickler-Beiwert für die Rampe	$[m^{1/3}/s]$
d_{65}	= Steindurchmesser bei 65% Siebdurchgang	$[m]$
d_s	= äquivalenter Steindurchmesser	$[m]$

Tritt auf der Rampe ein Fließwechsel auf, so muss wie folgt vorgegangen werden (LUBW, 2007):

1. Berechnung des spezifischen Abflusses auf der Rampe:

$$q_{R,ist} = \frac{Q}{b_R} \quad (18)$$

mit

$$\begin{array}{lll} q_{R,ist} & = \text{spezifischer Abfluss (bei Fließwechsel)} & [\text{m}^3/(\text{s m})] \\ b_R & = \text{Breite der Rampe} & [\text{m}] \end{array}$$

2. Ermittlung der spezifischen Energiehöhe auf der Rampenkronen:

$$H_E = h_o - w + \frac{v_o^2}{2g} \quad (19)$$

mit

$$\begin{array}{lll} H_E & = \text{spezifische Energiehöhe} & [\text{m}] \\ w & = \text{Rampenkronen} & [\text{m}] \\ v_o & = \text{Fließgeschwindigkeit im Oberwasser} & [\text{m/s}] \end{array}$$

3. Berechnung der steinbezogenen Froude-Zahl Fr_s :

$$Fr_s = \frac{q_{R,ist}}{d_s^{\frac{3}{2}} \cdot \sqrt{g}} \quad (20)$$

4. Berechnung des Abflussbeiwertes c_q in Abhängigkeit von Fr_s :

$$\begin{aligned} c_q &= 0,474 + \frac{5,098 \cdot Fr_s}{120 + 6,295 \cdot Fr_s^2} \quad \text{für } Fr_s \leq 4 \\ c_q &= 0,566 \quad \text{für } Fr_s > 4 \end{aligned} \quad (21)$$

5. Berechnung des spezifischen Rampenabflusses q_R

$$q_R = c_q \cdot \frac{2}{3} \cdot \sqrt{2g} \cdot H_E^{\frac{3}{2}} \quad (22)$$

6. Wenn $q_{R,ist} \leq q_R$, dann ist der Nachweis erbracht. Wenn nicht, ist die Rampenbreite zu gering und die Werte der Vordimensionierung müssen korrigiert werden, bis der Nachweis erbracht ist.

Nach dem Nachweis der Hochwasserneutralität folgt die Berechnung des Bemessungsabflusses, der für die spätere konstruktive Bemessung erforderlich ist. Dieser ist der Abfluss, bei dem das Deckwerk maximal belastet wird. In der Praxis gibt es zur Berechnung des Abflusses zwei Ansätze, die je nach Rampenhöhe verwendet werden. Bei geringer Rampenhöhe ($h_R \leq 1$ m) wird der Bemessungsabfluss dem „bettbildenden Abfluss“ gleichgesetzt, welcher im Wesentlichen dem MHQ entspricht. Ist die Rampenhöhe $h_R > 1$ m, so ist der Bemessungsabfluss nur mit sehr hohem Aufwand zu berechnen, indem man eine obere und eine untere Grenze bestimmt. (LUBW, 2007)

Dieses Verfahren bei $h_R > 1$ m beruht auf empirischen Formeln zur Berechnung und ist in LUBW (2007) beschrieben. Eine ausführliche Beschreibung würde an dieser Stelle zu weit führen.

Nach der hydraulischen Bemessung der Rampe bzw. der Gleite folgt die konstruktive Ausbildung. Maßgebender Faktor ist hierbei die Steinstabilität und die dafür benötigte Steinmasse für die Rampe sowie der Steindurchmesser.

Für die Steinstabilität existieren diverse empirisch ermittelte Ansätze. Es wird unterschieden in der Berechnung für Schüttsteinrampen und Setzsteinrampen. Eine grafische Auswertung für verschiedene Ansätze ist in Abbildung 22 zu sehen. Hier werden die Ansätze anhand der dimensionslosen steinbezogenen Froude-Zahl verglichen. Auffällig ist, dass die Kurven bei niedrigeren Rampenneigungen weiter auseinander liegen, sich die Bemessungsansätze also stärker unterscheiden. Dies liegt an den verschiedenen Versuchsbedingungen und Bemessungsgrenzen.

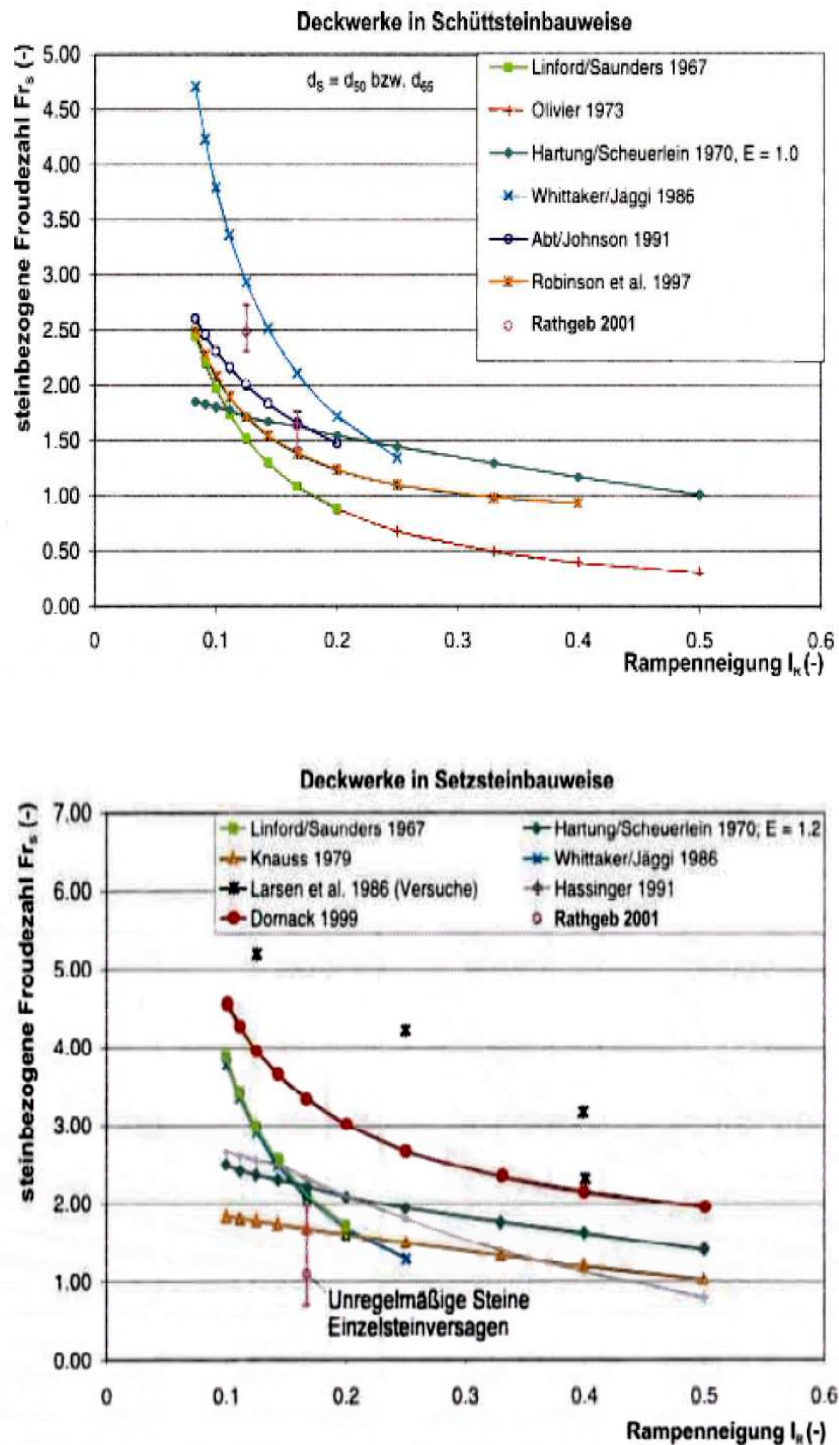


Abbildung 22: Grafische Auswertung verschiedener Ansätze zur Steinstabilität (LUBW, 2007)

Der LUBW (2007) empfiehlt für Setzsteinrampen die Berechnung nach Hartung/Scheuerlein, da diese im typischen Neigungsbereich der Rampe von $I_R > 0,2$ eine gute Mittelung der verschiedenen Ansätze liefert.

Bei Schüttsteinrampen wird der Ansatz nach Whittaker und Jäggi empfohlen, da diese eine sehr fundierte Bemessungsgrundlage aufweisen (LUBW, 2007). Allerdings wird hier nach Aberle und Kulisch (2009a) die Stabilität im Gegensatz zu anderen Ansätzen überschätzt.

Dies zeigt, dass die Bemessung der Deckschicht bei rauen Rampen und Gleiten immer noch Gegenstand der Forschung ist und noch kein universeller Bemessungsansatz vorliegt.

Im Folgenden wird nun beispielhaft der Ansatz nach Whittaker und Jäggi erläutert.

Auch hier ist ein iterativer Prozess erforderlich, bei dem der Steindurchmesser der Decksteine variiert werden muss, um den maximalen stabilen Abfluss $q_{R,max}$ nicht zu überschreiten. Zu beweisen ist nach LUBW (2007):

$$q_{R,ist} \leq q_{R,max} \quad (23)$$

Hierfür wird zunächst ein äquivalenter Steindurchmesser d_s gewählt. Ebenfalls sind die Rampenneigung und die Dichte der Steine bekannt.

Nun kann der kritische spezifische Abfluss berechnet werden, für den nach Whittaker und Jäggi (1986) das Deckwerk gerade noch stabil ist:

$$q_{R,crit} = 0,257 \cdot \sqrt{\frac{\rho_s - \rho_w}{\rho_w}} \cdot \sqrt{g} \cdot I_R^{-\frac{7}{6}} \cdot d_{65}^{\frac{3}{2}} \quad (24)$$

mit

$q_{R,crit}$	= kritischer spezifischer Abfluss	$[m^3/(s \cdot m)]$
ρ_s	= Dichte des Wassers	$[kg/m^3]$
I_R	= Rampenneigung	$[-]$

Für d_{65} kann Gleichung (17) herangezogen werden.

Die Autoren empfehlen für den maximalen spezifischen Abfluss einen Sicherheitsabschlag von 20%, sodass für den maximalen Abfluss Folgendes angenommen werden kann (Whittaker und Jäggi, 1986):

$$q_{R,max} = q_{R,crit} \cdot 0,8 \quad (25)$$

Nun kann der vorhandene spezifische Abfluss $q_{R,ist}$ (Gleichung (18)) mit dem errechneten maximalen Abfluss verglichen werden.

Trifft die Gleichung (23) zu, so kann der gewählte Steindurchmesser angenommen werden. Andernfalls ist ein neuer Durchmesser zu wählen und obige Berechnungen erneut durchzuführen, bis die Gleichung erfüllt ist.

Aus dem Steindurchmesser lässt sich danach die Schichtstärke und die Steinmasse errechnen. LUBW (2007) empfiehlt folgende Schichtdicke:

$$Schichtdicke \geq 2 \cdot d_s \quad (26)$$

Die Steinmasse m_s ergibt sich aus (LUBW, 2007):

$$m_s = \frac{\rho_s \cdot \pi \cdot d_s^3}{6} \quad (27)$$

5.5. Bemessung von Schwellen

Die Bemessung von Schwellen erfolgt nicht nach dem Grundsatz der hydraulischen Wirksamkeit, wie er in der DIN19661-2 (2000-09) beschrieben ist. Sohlenschwellen verursachen keine hydraulischen Veränderungen, sodass sich die Bemessung nur auf das Sohlengefälle und den Bemessungsabfluss beschränkt. Auch bei Grundswellen erfolgt kein Fließwechsel, sondern das Wasser wird örtlich beschleunigt, was zu einer Absenkung des Wasserspiegels führt (Abbildung 23). Gewellter Abfluss ist zu vermeiden. (DIN19661-2, 2000-09)

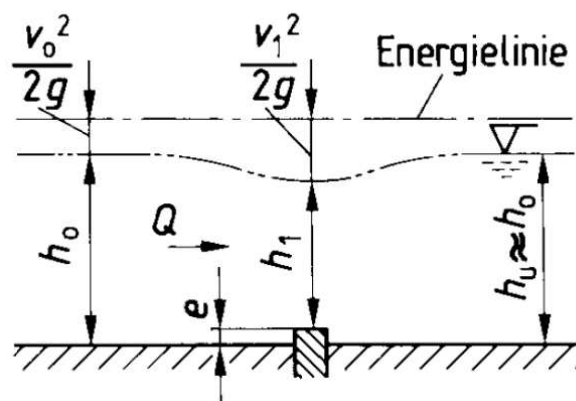


Abbildung 23: Abflussvorgang auf einer Grundschwelle (DIN19661-2, 2000-09)

Um die Höhe der Grundschwelle zu bemessen, sodass kein Fließwechsel auftritt, kann folgende Formel verwendet werden (DIN19661-2, 2000-09):

$$e \leq h_0 + \frac{v_0^2}{2g} - \frac{3}{2} \cdot \sqrt[3]{\frac{Q^2}{g \cdot b^2}} \quad (28)$$

mit

e	= Schwellenhöhe	[m]
b	= Querschnittsbreite	[m]

Stützswellen sind wegen ihrer Höhe und des erforderlichen Fließwechsels getrennt von den anderen beiden Schwellenarten zu betrachten. Zu der hydraulischen Bemessung können die Berechnungsansätze für Wehre und Tosbecken angewendet werden. (DIN19661-2, 2000-09)

Stützschwellen müssen den vorgegebenen Bemessungsabfluss abführen können, sie dürfen keine Sogwirkung entwickeln und die Energieumwandlung muss in Form eines Wechselsprungs vollständig im Tosbecken stattfinden (Patt und Gonsowski, 2011). Zudem sollte die Wehrrückenform einen abgelösten Strahl vermeiden, also so gewählt werden, dass der Wasserstrahl am Rücken anliegt. Des Weiteren muss das Bauwerk den in Kapitel 5.6 aufgezeigten Standsicherheitsnachweisen genügen und ausreichend gegen Schwingungen gesichert sein.

Zur Berechnung des vollkommenen Überfalls über die Stützschwelle kann die Überfallformel nach Poleni angewendet werden:

$$Q = \frac{2}{3} \cdot \mu \cdot \sqrt{2g} \cdot b \cdot H_B^{\frac{3}{2}} \quad (29)$$

mit

H_B	= Überfallhöhe	[m]
μ	= Überfallbeiwert	[-]

Hierbei richtet sich der Überfallbeiwert μ nach der Form des Rückens der Stützschwelle (Abbildung 24).



					
breit, scharfkantig	breit, abgerundet	völlig abge- rundet, umgelegte Klappe	scharf- kantig, Strahl- belüftung	senkrechte OW-Seite, geneigte UW-Seite	dachförmig, Krone abgerundet
0,49...0,51	0,50...0,55	0,65...0,73	0,62...0,68	0,72...0,75	0,78...0,81

Abbildung 24: Überfallbeiwerte für die Poleni-Formel (Lattermann, 2005)

Die optimale Wehrrückenform, die für oben genannte Bedingungen benötigt wird, kann mithilfe der Formeln des amerikanischen United States Army Corps of Engineers (USACE) errechnet werden, die auf Modellversuchen basieren (Patt und Gonsowski, 2011) und in Abbildung 25 dargestellt sind.

5.6. Stabilitätsnachweise für Wasserbauwerke

Im Folgenden werden die Grundzüge für eine Prüfung der Stabilität von Sohlenbauwerken dargelegt. Dies sind nur überschlägige Berechnungsmethoden und dienen zum Verständnis der Kräfte und der zu beachtenden Aspekte. Tiefergehende geotechnische Nachweise werden hier nicht behandelt.

Grundsätzlich müssen für alle Wasserbauwerke, also sowohl für Wehre als auch für Sohlenbauwerke, geotechnische Nachweise nach DIN 1990 und DIN 19702 geführt werden. Hierbei muss die Stabilität sowohl für das Bauwerk als Ganzes als auch für alle Einzelteile nachgewiesen werden. Zu beweisen ist die Gleitsicherheit, die Kippsicherheit, die Auftriebssicherheit und der Schutz vor hydraulischem Grundbruch. (Lattermann, 2005)

Um die geforderten Beweise zu führen, müssen zunächst alle Lasten ermittelt werden, die auf das Bauwerk wirken. Abbildung 26 zeigt die unterschiedlichen Kräfte auf ein Bauwerk. Hierbei wird zwischen horizontalen und vertikalen Kräften unterschieden, aber auch nach Kraftursache. Zunächst ist das Eigengewicht G des Bauwerkes zu berücksichtigen. Hinzu kommen die Wasserauflasten WA und der Wasserdruck W . Ebenfalls nötig zur Berechnung sind der Erddruck E und der Sohlenwasserdruck S .

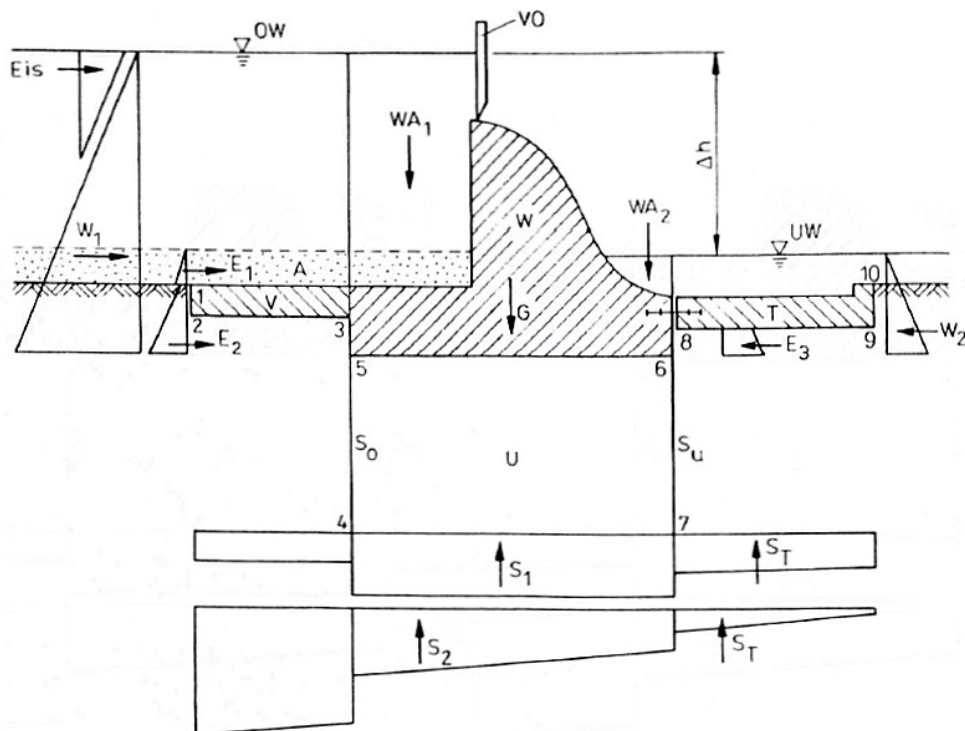


Abbildung 26: Kräfte auf ein Wehr (Lattermann, 2005)

Zunächst muss ein Bauwerk gegen das Weggleiten gesichert sein. Hierzu dient folgende Formel für die Gleitsicherheit (Patt und Gonsowski, 2011, Lattermann, 2005):

$$n_{Gl} = \frac{V \cdot \tan \phi}{H_K} \geq 1 \dots 3 \quad (30)$$

mit

n_{Gl}	= Gleitsicherheit	[-]
H_K	= horizontale Kräfte	[N]
Φ	= Reibungszahl	[-]

Die Formel variiert bei kohäsivem Material (Patt und Gonsowski, 2011):

$$n_{Gl} = \frac{V \cdot \tan \phi + \tau_s \cdot F}{H_K} \geq 3,5 \quad (31)$$

mit

τ_s	= Kohäsion	[N/m ²]
F	= Aufstandsfläche Bauwerk	[m ²]

Des Weiteren darf das Bauwerk nicht kippen, somit muss die Kippsicherheit, auch Spannungsnachweis genannt, bewiesen werden. Dies ist meist für den Revisionsstand durchzuführen (Patt und Gonsowski, 2011). Hierzu muss die Resultierende aus horizontalen und vertikalen Kräften durch den Kern der Standfläche gehen. Die Kippsicherheit n_K berechnet sich also bezogen auf einen Fußpunkt des Bauwerkes durch (Patt und Gonsowski, 2011):

$$n_K = \frac{\text{rückhaltende Momente}}{\text{kippende Momente}} \quad (32)$$

Damit das Bauwerk nicht auftreibt, muss folgende Formel zur Auftriebssicherheit n_A erfüllt sein (Patt und Gonsowski, 2011):

$$n_A = \frac{WA + G}{S} \geq 1,2 \quad (33)$$

Nicht zuletzt muss das Bauwerk vor einem hydraulischen Grundbruch, also einer Unterspülung gesichert sein. Hierzu benötigt man Kenntnis über die bodenmechanischen Kennwerte und ein Potentialliniennetz des Untergrundes (Abbildung 27).

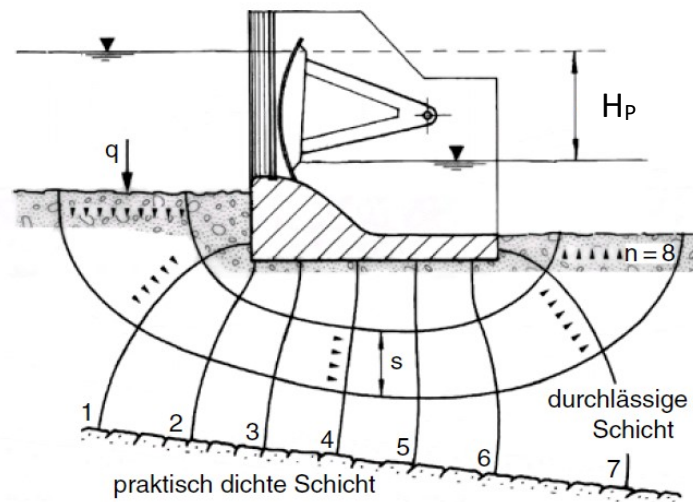


Abbildung 27: Potentialnetz des Bodenkörpers unter einem Wehr (Patt und Gonsowski, 2011)

Aus der Bodenart lässt sich ein kritisches Sickergefälle I_{crit} bestimmen, das nicht überschritten werden darf, um den Grundbruch zu vermeiden (Patt und Gonsowski, 2011). Nach Darcy berechnet sich das Sickergefälle mithilfe der Stromlinien und Potentiallinien (Patt und Gonsowski, 2011):

$$I = \frac{q}{m \cdot s \cdot k_f} = \frac{H_p}{n \cdot s} \quad (34)$$

$$q = \frac{m}{n} \cdot k_f \cdot H_p \quad (35)$$

mit

I	= Sickergefälle	[-]
q	= Sickerwassermenge	[m ³ /s]
m	= Anzahl an Stromröhren	[-]
n	= Anzahl der Potentialstufen	[-]
k_f	= Durchlässigkeitsbeiwert nach Darcy	[m/s]
s	= Stärke der betrachteten Stromröhre	[m]
H_p	= Potentialhöhe/Fallhöhe	[m]

Vergleicht man das berechnete Gefälle nun mit dem bodentypischen Wert, so muss gelten:

$$I \leq I_{crit} \quad (36)$$

5.7. Ökologische Aspekte der Bemessung

Neben der richtigen hydraulischen und konstruktiven Bemessung hinsichtlich der Bauwerksstabilität rücken heutzutage die ökologischen Aspekte immer weiter in den Vordergrund. Gerade durch die Wasserrahmenrichtlinie und weitere bundes- und länderspezifischen Regelungen wird es immer wichtiger, auch die ökologische Durchgängigkeit schon bei der Bemessung zu beachten.

Sohlenbauwerke haben viele verschiedene Auswirkungen auf das Fließgewässer und die damit verbundenen Ökosysteme. Neben den wie in den Kapiteln 2 und 4 beschriebenen Aufgaben und positiven Aspekten kann ein solches Bauwerk aber auch negative Folgen für das Gewässer mit sich bringen. Um dies bestmöglich zu verhindern und den Einsatz ökologisch und ökonomisch abzuwägen, müssen zunächst die Auswirkungen erfasst werden, um dann Lösungsansätze und Handlungsvorschläge zu liefern.

Durch Sohlenbauwerke wird das Fließgewässersystem verändert und damit die Lebensraumfunktion für Fließgewässerbiozöten. Sowohl die Sohle als auch das Ufer haben wichtige Lebensraumfunktionen für Fische und andere wirbellose Organismen (Gebler, 1991). Durch die Reduktion der Fließgeschwindigkeit oberstrom und unterstrom des Bauwerks und die veränderten Strömungsverhältnisse kann sich das Artenspektrum des Gewässerabschnitts deutlich verändern (Winkler, 2009b). Einige Lebewesen, die eine bestimmte Strömungsgeschwindigkeit zum Überleben benötigen, werden so verdrängt. Die niedrigere Fließgeschwindigkeit lässt auch die Temperatur des Gewässers ansteigen, was wiederum zu einer Sauerstoffzehrung und eventueller pH-Wert-Erhöhung führen kann (Winkler, 2009b). Dies wird allerdings bei rauen Sohlenbauwerken wie Rampen durch vermehrte Verwirbelung und dem damit verbundenen Sauerstoffeintrag in Teilen kompensiert. Ebenfalls kann es durch vermehrte Sedimentation von Sand und Schlamm in der Nähe des Sohlenbauwerks oder durch eine gänzliche Unterbrechung des Geschiebehaushalts zu einer Änderung des Lebensraums führen (Winkler, 2009b).

Ein zweiter Aspekt neben der Lebensraumfunktion ist die Auswirkung auf das Fließgewässerkontinuum, insbesondere auf die ökologische Durchgängigkeit. Der Fluss hat als Ganzes eine Migrationsfunktion für viele Organismen, die aus unterschiedlichsten Gründen im Fließgewässer auf- oder abwandern. Einige Wanderungen dienen dem Laichen,

der Überwinterung oder der Nahrungssuche (Winkler, 2009b). Ebenfalls finden Wanderungen zur Kompensation von Standortverlusten oder zur Wiederbesiedelung von Gebieten nach Katastrophen statt (Winkler, 2009b).

Um diese Wanderungen zu ermöglichen, dürfen Bauwerke keine zu großen Absturzhöhen besitzen oder müssen ein Lückensystem für Fische aufweisen. Ebenfalls spielt die Wassertiefe über dem Bauwerk und die Struktur eine Rolle, sowie der Zeit- und Energieverlust, der zur Überwindung notwendig ist (Abbildung 28). Hier können mehrere Bauwerke hintereinander eine kumulierte Wirkung besitzen, sodass der Abschnitt insgesamt unpassierbar wird. (Winkler, 2009b, Gebler, 2009)



Abbildung 28: Raugerinne mit zu geringer Wassertiefe (DWA-M509, 2014)

Nicht zuletzt beeinflussen Sohlenbauwerke die Fließgewässerentwicklung und das Auen-system. Hier sind nicht nur negative Folgen zu nennen. Zwar wird das Fließgewässer durch das Bauwerk örtlich fixiert und somit in seiner dynamischen Entwicklung unterbrochen, aber gerade bei kleinen Gewässern ist dies meist unerheblich. Durch den Aufstau am Bauwerk wird der Grundwasser-Flurabstand im Oberwasser verringert, sodass um den Fluss neue Auen und Feuchtbiotope entstehen können. Bei Hochwasser werden diese dann ebenfalls durch die Aufstauwirkung schneller überflutet, was wichtig für die Auenentwicklung ist. (Winkler, 2009b)

Natürlich sollte beim Bau von Sohlenbauwerken ebenfalls auf die Ästhetik und die Einbindung in das Landschaftsbild geachtet werden (Winkler, 2009b). Hierbei bieten sich naturnahe Baumaterialien und eine Bildung von unterschiedlichen Strömungsmustern an.

Aus diesen Aspekten lassen sich generelle Konzepte zum Bau von Sohlenbauwerken ableiten, um möglichst viele negative Folgen zu vermeiden. Gebler (1991) hat diese zusammengefasst:

- Querbauwerke wenn möglich, immer vermeiden und durch andere Maßnahmen ersetzen
- Mehrere niedrigere Schwellen/Rampen einem hohen Bauwerk vorziehen
- Stufen als Steinschwellen und Rampen in aufgelöster Form gestalten
- nicht mehr erforderliche Abstürze und Wehre abreißen oder kontrolliert zerfallen lassen
- Abstürze in Rampen umgestalten
- Wenn keine Umgestaltung möglich ist, Teilrampen einsetzen

Neben generellen Handlungshinweisen können auch konkrete Dimensionsgrundlagen bei der Bemessung von Sohlenbauwerken berücksichtigt werden, um eine möglichst gute Passierbarkeit des Bauwerks zu erreichen.

Das DWA-Merkblatt (DWA-M509, 2014) schlägt folgendes Vorgehen vor:

1. Bestimmung der Fließgewässerregion
2. Festlegung des Konstruktionstyps
3. Bestimmung der Baulänge, des Höhenunterschiedes und der maximalen Fließgeschwindigkeit
4. Bestimmung des relevanten Artenspektrums
5. Ermittlung der geometrischen Grenzwerte

Hier können bei den ersten Schritten schon einige Werte durch die hydraulische Dimensionierung des Bauwerkes in der Bemessung vorgegeben sein.

Demnach werden zunächst die hydraulischen Anforderungen an das Bauwerk festgelegt, bei denen die jeweiligen betrachteten Fischarten dieses noch passieren können. Hierbei muss zwischen verschiedenen Geschwindigkeiten der Fische unterschieden werden, der

Sprintgeschwindigkeit, der gesteigerten Schwimmgeschwindigkeit und der Dauer-Geschwindigkeit. Diese Geschwindigkeiten unterscheiden sich je nach Fischart, sind aber auch von vielen Randbedingungen abhängig.

Deswegen werden verschiedene Grenzwerte für die maximale Fließgeschwindigkeit eines Sohlenbauwerks festgelegt (Tabelle 7).

Tabelle 7: Grenzwerte für die maximale Fließgeschwindigkeit v_{\max} (m/s) (DWA-M509, 2014)

Gesamthöhenunterschied	Fließgewässerregion					
	Obere Forellen-region	Untere Forellen-region	Äschen-region	Barben-region	Brachsen-region	Kaulbarsch - Flunder-Region
Beckenartige Bauwerke						
< 3 m	2,2	2,1	2,0	1,8	1,7	1,6
3m bis 6 m	2,1	2,0	1,9	1,7	1,6	1,5
6 m bis 9 m	2,0	1,9	1,8	1,6	1,5	1,4
> 9 m	1,9	1,8	1,7	Einzelfallentscheidung		
Gerinneartige Bauwerke						
< 5 m	2,0	1,9	1,8	1,6	1,5	1,4
5 m bis 10 m	1,7	1,6	1,5	1,4	1,3	1,2
> 10 m bis 25 m	1,5	1,4	1,3	1,2	1,1	1,0
Raugrinne in Störsteinbauweise						
< 5 m	2,1	2,0	1,9	1,7	1,6	1,5
5 m bis 10 m	1,9	1,8	1,8	1,6	1,5	1,4
> 10 m	1,7	1,6	1,5	1,4	1,3	1,2

Die darauf folgende geometrische Dimensionierung richtet sich nach den Körpermaßen der vorkommenden Fische und lässt sich anhand dieser Parameter bemessen. Wichtig hierbei sind vor allem die Länge und die Höhe sowie die Dicke der Fische (Abbildung 29).

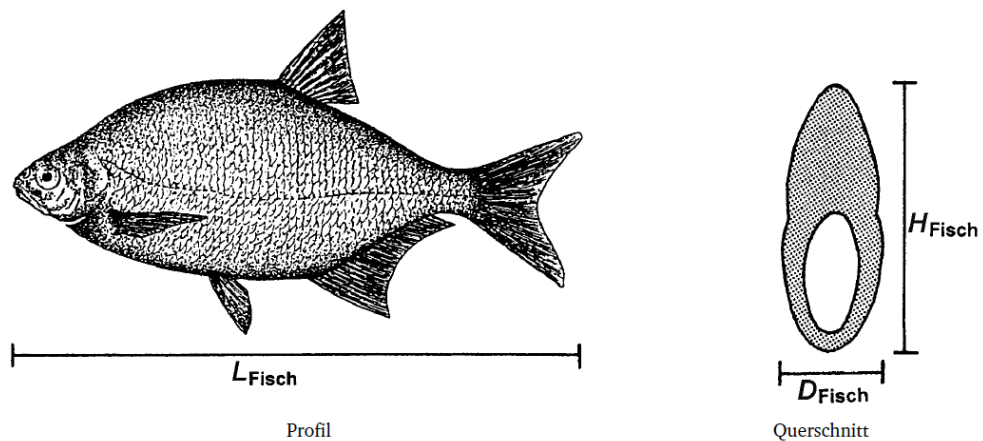


Abbildung 29: Dimensionierungsrelevante Körpermaße von Fischen (DWA-M509, 2014)

Hierfür gibt es ebenfalls Tabellen, die schon berechnete Grenzwerte auflisten (Tabelle 8).

Für Rampen in Beckenbauweise oder anderen aufgelösten Varianten empfiehlt Gebler (2009) folgende Mindestabmessungen, um die Passierbarkeit zu gewährleisten. Diese beruhen ebenfalls auf den Körpermaßen der jeweiligen für den Gewässerabschnitt typischen Fischarten:

- Lichte Beckenlänge: $3 \times L_{\text{Fisch}}$
- Lichte Beckenbreite: $2 \times L_{\text{Fisch}}$
- Beckentiefe: $5 \times H_{\text{Fisch}}$
- Tiefe Durchlässe: $2 \times H_{\text{Fisch}}$
- Lichte Breite Durchlässe: $3 \times D_{\text{Fisch}}$

Tabelle 8: Geometrische Grenzwerte nach Fischmaßen (DWA-M509, 2014)

Art	Hauptverbreitungsgebiet					Längsabstand von Einbauten (m)	Wassertiefe (m)		Breite Wanderkorridor (m)		
	Forellenregion	Äschenregion	Barbenregion	Brachsenregion	Kaulbarsch- Flunder-Region		Wanderkorridor	Eng- stelle	Länge der Engstelle		
									punktuell	≤ 2 m	> 2 m
						$3\ l_{\text{Fisch}}$	$2,5\ H_{\text{Fisch}}$	$2\ H_{\text{Fisch}}$	$3\ D_{\text{Fisch}}$	$6\ D_{\text{Fisch}}$	$9\ D_{\text{Fisch}}$
Bachforelle						1,50	0,24	0,19	0,15	0,30	0,45
Äsche						1,50	0,24	0,19	0,15	0,30	0,45
Huchen						3,00	0,40	0,32	0,36	0,72	1,08
Seeforelle						3,00	0,53	0,42	0,36	0,72	1,08
Perlfisch						2,10	0,32	0,25	0,21	0,42	0,63
Döbel						1,80	0,40	0,32	0,30	0,59	0,89
Lachs						3,00	0,42	0,34	0,30	0,60	0,90
Meerforelle						2,40	0,42	0,33	0,27	0,54	0,81
Quappe						1,80	0,27	0,22	0,32	0,63	0,95
Plötze						1,20	0,32	0,25	0,18	0,35	0,53
Barbe						2,10	0,33	0,26	0,25	0,51	0,76
Nase						1,80	0,39	0,31	0,28	0,56	0,84
Zährte						1,50	0,31	0,25	0,17	0,33	0,50
Sterlet						2,70	0,38	0,31	0,32	0,65	0,97
Aland						1,80	0,45	0,36	0,28	0,55	0,83
Brachsen						1,80	0,52	0,42	0,18	0,36	0,54
Rapfen						2,10	0,37	0,30	0,22	0,45	0,67
Barsch						1,20	0,31	0,25	0,21	0,42	0,63
Hecht						3,00	0,35	0,28	0,30	0,60	0,90
Zander						2,40	0,38	0,30	0,29	0,58	0,87
Wels						4,80	0,64	0,51	0,72	1,44	2,16
Maifisch						2,40	0,40	0,32	0,45	0,90	1,35
Karpfen						2,40	0,60	0,48	0,38	0,77	1,15
Karausche						1,35	0,34	0,27	0,22	0,43	0,65
Schleie						1,80	0,39	0,31	0,27	0,54	0,81
Stör						9,00	1,28	1,02	1,08	2,16	3,24
Finte						1,50	0,25	0,20	0,15	0,30	0,45
Schnäpel						1,20	0,20	0,16	0,12	0,24	0,36
ANMERKUNGEN											
Die farbliche Markierung des Hauptverbreitungsgebietes entspricht der Farbgebung der Fließgewässerregionen gemäß 3.1.4.1.											
Für die Breite der Schlupflocher konventioneller Beckenpässe gelten gemäß 4.6.3.5 höhere Werte.											

6. Vorgehen bei der Sanierung

Da an vielen Flüssen heute alte Sohlenbauwerke und Wehre stehen, „gehört die Modernisierung [und Sanierung] von Wasserbauten mittlerweile zu den vorrangigen Aufgaben des konstruktiven Wasserbaus“ (Strobl und Zunic, 2006) und gleicht häufig im Umfang einem Neubau. Die Gründe für eine Sanierung können stark variieren. Zum einen kann durch die Sanierung die Effizienz und Zuverlässigkeit der Anlage gesteigert werden und so höheren Ansprüchen im Naturschutz, der Durchgängigkeit und Umweltverträglichkeit gerecht werden (Strobl und Zunic, 2006). Zum anderen können veränderte Bemessungsgrundlagen oder Nutzungen, neue Erkenntnisse durch Normen, betriebliche oder bauliche Gründe wie Schäden oder Verschleiß zur Notwendigkeit einer Sanierung beitragen (Lattermann, 2005).

Sohlenbauwerke und Wehre sind Angriffen ausgesetzt, die zu Schäden an der Bausubstanz führen können. So müssen sie physikalischen Angriffen wie Feuchte, Temperatur oder Frost genauso widerstehen wie mechanischen Angriffen durch Geschiebe oder Eisdruck. Hinzu kommen chemische Angriffe von Wasserinhaltsstoffen und biologische Angriffe von Bakterien, Algen, Schwämmen oder Pilzen. (Hallauer, 1986)

Um zu überprüfen, ob eine Sanierung notwendig ist, müssen demnach die Bauwerke auf Schäden und Mängel untersucht werden, die durch diese Angriffe ausgelöst wurden. Hierzu bedarf es einer Analyse der Bausubstanz, der bodenmechanischen, hydraulischen und hydrologischen Gegebenheiten. Des Weiteren werden aktuelle und künftige Voraussetzungen hinsichtlich weiterer Sanierungsgründe, die oben genannt wurden, geprüft (Strobl und Zunic, 2006). Erst danach können geeignete Sanierungsmaßnahmen gewählt werden.

Gegebenenfalls ist bei Sohlenbauwerken aus Beton eine Betoninstandsetzung durchzuführen, wenn der Beton porös ist und Fugen, Kiesnester oder Klüfte aufweist. Dies tritt häufig bei Stampfbeton auf. Dann kann eine hydraulische Bindemittelsuspension injiziert werden, die die Klüfte schließt. (Strobl und Zunic, 2006)

Ebenfalls können an Beton Kavitationsschäden auftreten, sodass die Bauteile ersetzt werden müssen. Vor allem Schussrinnen und Tosbecken sind davon betroffen, da hier hohe Strömungsgeschwindigkeiten vorherrschen. Dem kann vorgebeugt werden, indem Beton

von hoher Festigkeit benutzt, eine optimierte Form modelliert oder der Beton durch Panzerungen geschützt wird. (Strobl und Zunic, 2006)

Neben Schäden können, wie oben genannt, auch andere Gründe für eine Sanierung sprechen, wie die ökologische Gestaltung des Fließgewässers. So werden heute viele Wehre und Abstürze im Zuge der Wasserrahmenrichtlinie und der Wiederherstellung der Durchgängigkeit von Gewässern umgestaltet, modernisiert oder abgerissen. Abstürze und Wehre können entweder durch Bagger oder Sprengung abgerissen, kontrolliert einem natürlichen Zerfall unterworfen oder mithilfe von Blocksteinen zu Rampen oder Gleiten umgebaut werden (Gebler, 2009, Gebler, 1991).

Zur Umgestaltung von Abstürzen und Wehren können Blocksteine vor und hinter das Bauwerk geschüttet werden, sodass eine Rampe entsteht. Manchmal ist es sinnvoll, die Stufe teilweise vorher abzureißen und dann mit Steinen zu überbauen, damit keine Absätze entstehen und das Lückensystem vollständig ausgebildet werden kann. (Gebler, 1991)

Allerdings ist meist „der vollständige Rückbau ökologisch sinnvoller und finanziell wesentlich kostengünstiger (...), als eine teure und die biologische Durchgängigkeit nur teilweise wiederherstellende Umgestaltung eines Sohlenabsturzes“ (Winkler, 2009a). Trotzdem ist im Vorfeld zu überlegen, ob ein vollständiger Rückbau im Einzelfall hinsichtlich hydraulischer Gründe durchgeführt werden kann.

Ebenfalls muss im Vorfeld geprüft werden, ob der ursprüngliche Zweck des Bauwerkes noch gegeben ist, das Bauwerk heute noch genutzt wird, z.B. zur Wasserentnahme oder als Wasserkraftanlage, und ob Wasserrechte auf dem Bauwerk liegen (Gebler, 2009).

Weitere negative Auswirkungen einer Umgestaltung können Setzungsschäden an nahegelegenen Gebäuden, Straßen und Brücken aufgrund von veränderten Aufstauverhältnissen sein. Ebenfalls wirkt sich ein geringerer Aufstau auf eventuell zu schützenden Biotopen und Auen aus. Durch veränderte Fließeigenschaften kann es vermehrt zu Sohlvertiefungen kommen. Des Weiteren kann sich das Retentionspotential des Gewässerabschnittes verringern. (Winkler, 2009a, Gebler, 2009)

Somit muss der Umgestaltung eine sorgfältige Prüfung vorangehen, um die Auswirkungen abzuwägen. Winkler (2009a) hat dazu ein Prüfschema entwickelt, das bei der Entscheidungsfindung hilft (Abbildung 30).

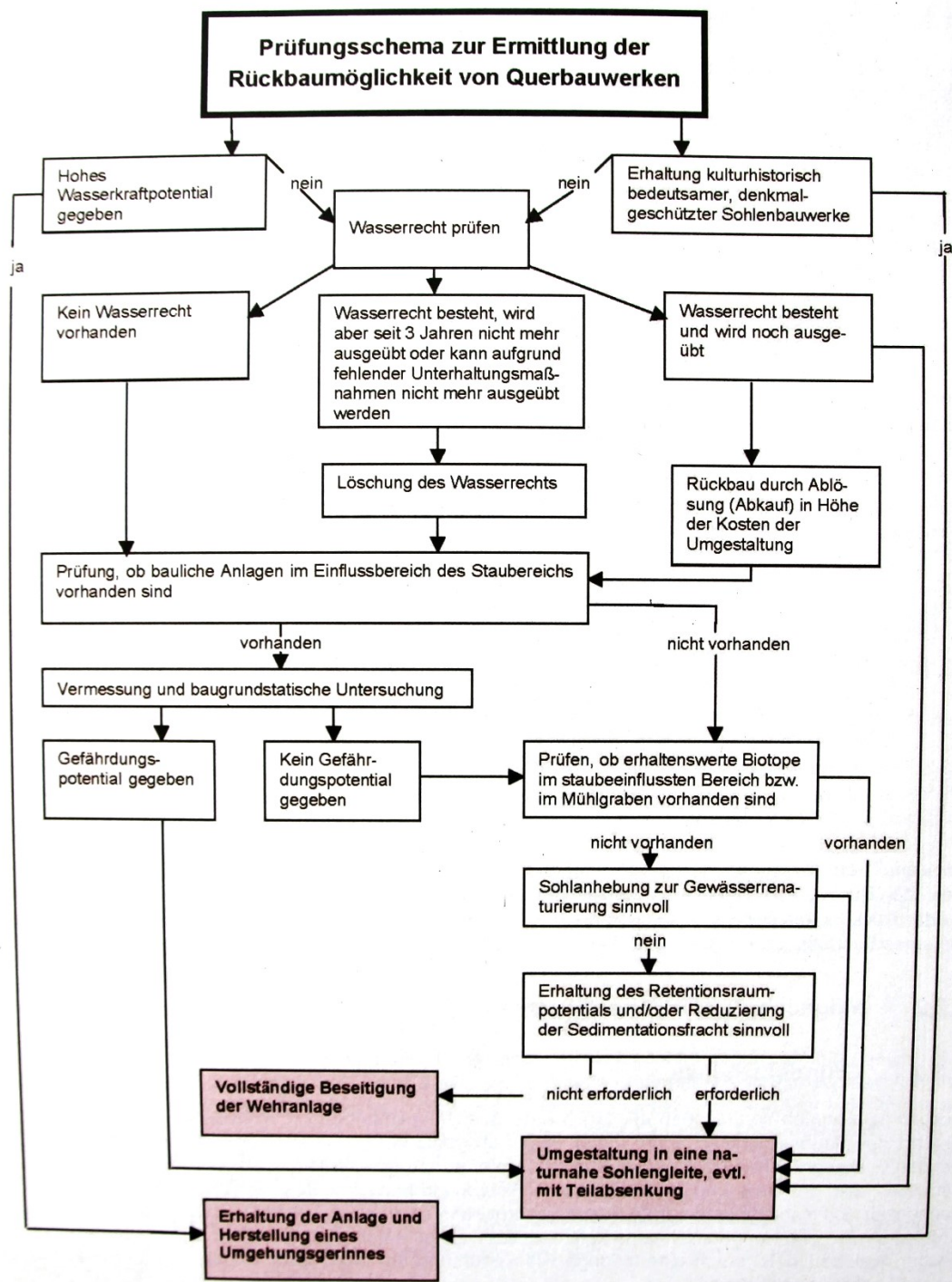


Abbildung 30: Prüfschema zur Ermittlung der Rückbaumöglichkeiten von Querbauwerken (Winkler, 2009a)

Wird ein Wehr noch benötigt, so sollte dies zumindest durch eine Teilrampe versehen werden, um die ökologische Durchgängigkeit zu verbessern (Abbildung 31). Hierbei wird ein Teil der Gewässerbreite als Rampe bzw. Gleite gebaut, was als Fischweg fungiert. (Gebler, 2009)

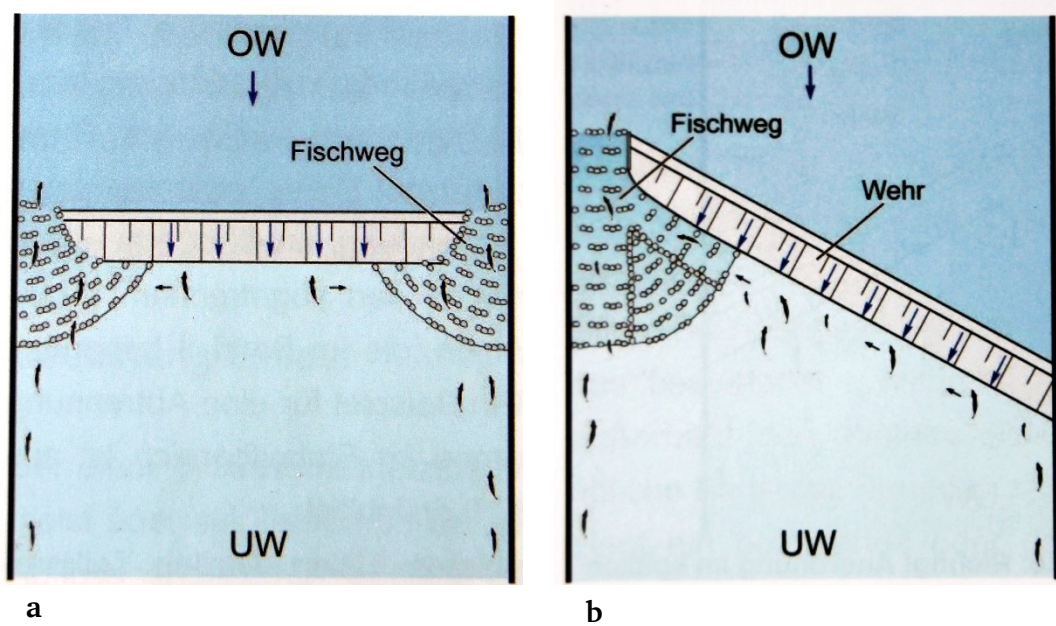


Abbildung 31: Teilrampen an Wehren **a** auf beiden Seiten, **b** auf einer Seite (Gebler, 2009)

Neben Sohlenbauwerken gibt es weitere Möglichkeiten, die Fließgeschwindigkeit und die Sohlenerosion zu regulieren. So kann bei günstigen Platzverhältnissen der Lauf des Gewässers verlängert werden, sodass das Gefälle verringert wird. Ebenfalls kann das Gerinne aufgeweitet werden. Dies erfordert allerdings genaue Kenntnis über den Geschiebetransport. Für kurzzeitige Schwankungen kann ebenfalls eine Geschiebezugabe das Gleichgewicht im Geschiebetransport wiederherstellen. (Hütte, 2000)

Praxisbeispiele zu verschiedenen Sanierungsmöglichkeiten sind im Anhang 4 beschrieben.

7. Zusammenfassung, Empfehlung und Ausblick

Die Gruppe der Sohlenbauwerke teilt sich in sieben verschiedene Bauwerkstypen. Schon allein diese Tatsache zeigt die Heterogenität dieser Bauwerksgruppe. Dazu kommt, dass die unterschiedlichen Bauwerkstypen wie Abstürze, Rampen oder Schwellen ebenfalls weitere Bauformen und Ausführungsvarianten besitzen, sodass es schier unendlich viele Möglichkeiten der Konstruktion von Sohlenbauwerken gibt. Jeder dieser Bauwerkstypen besitzt unterschiedliche Eigenschaften, um verschiedene Aufgaben und Anforderungen zu erfüllen. Dies führt dazu, dass es keine pauschalen Lösungen für Flüsse gibt, sondern jeweils individuelle Einzelentscheidungen für den jeweiligen Gewässerabschnitt hinsichtlich der Wahl und Konstruktion des Sohlenbauwerks gefällt werden müssen.

Generell können jedoch einige Aspekte berücksichtigt werden. So gelten Abstürze und Wehre als ökologisch weniger gut durchgängig als Rampen oder Gleiten. Deshalb geht der Trend zu naturnahen Lösungen mit Rampen und Wehre werden oft abgerissen oder rückgebaut. Doch nicht überall kann dies durchgeführt werden, sodass ebenfalls verbesserte Absturz- und Wehrformen benötigt werden, was in Zukunft weiter erforscht werden muss.

Des Weiteren sind verbesserte Rampen und Gleiten Gegenstand der aktuellen Forschung, wie z.B. die V-Rampe zeigt. Auch hier werden Formen gesucht, die gleichzeitig finanziell wie ökologisch günstig und einfach in Bau und Herstellung sind. Ebenfalls muss die Bemessung von Rampen weiter erforscht werden, da hier noch kein allgemeingültiger Ansatz existiert.

Im Zuge der Wasserrahmenrichtlinie sind diese genannten Aspekte schon heute zu berücksichtigen und werden in Zukunft noch weiter an Bedeutung gewinnen. Deshalb ist es wichtig, die bisherigen Sohlenbauwerke instand zu halten oder, wenn nötig, zu sanieren. Neue Bauwerke sind nach dem Stand der Technik zu errichten, um sowohl das Ökosystem Fluss zu schützen als auch die Nutz- und Schutzfunktionen für uns Menschen zu sichern.

Literaturverzeichnis

- ABERLE, J.;KULISCH, H. (2009a): Bemessung der Steinstabilität. In: DWA (ed.) DWA-Themen: Naturnahe Sohlengleiten.
- ABERLE, J.;KULISCH, H. (2009b): Hydraulik und numerische Simulation. In: DWA (ed.) DWA-Themen: Naturnahe Sohlengleiten. DWA.
- DIN4047-5 (1989-03): Landwirtschaftlicher Wasserbau; Begriffe; Ausbau und Unterhaltung von Gewässern, Berlin, Deutsches Institut für Normung e.V.
- DIN19661-2 (2000-09): Richtlinien für Wasserbauwerke - Sohlenbauwerke - Teil 2: Abstürze, Absturztreppe, Sohlenrampen, Sohlengleiten, Stützwälle, Grundschrwellen, Sohlenschrwellen, Berlin, Deutsches Institut für Normung e.V.
- DVWK (1990): Hydraulische Methoden zur Erfassung von Rauheiten. In: SCHRÖDER, R. C. M. (ed.) Schriftenreihe des Deutschen Verbandes für Wasserwirtschaft und Kulturbau e.V. Hamburg u.a.
- DWA-M509 (2014): Fischaufstiegsanlagen und fischpassierbare Bauwerke - Gestaltung, Bemessung, Qualitätssicherung, Hennef, Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V.
- GEBLER, R.-J. (1991): Naturgemäße Bauweisen von Sohlenbauwerken und Fischaufstiegen zur Vernetzung der Fließgewässer. Mitteilungen Heft 181. Karlsruhe, Institut für Wasserbau und Kulturtechnik Universität Karlsruhe.
- GEBLER, R.-J. (2009): Fischwege und Sohlengleiten Grundlagen und Beispiele aus der Praxis : 1. Sohlengleiten. Walzbachtal.
- HALLAUER, O. (1986): Schadensanalyse an Massivbauten des Verkehrswasserbaues. In: DVWK (ed.) DVWK-Schriften: Sanierung von Wasserbauten - Beiträge zum Symposium 1986 in München. Hamburg, Berlin, DVWK.
- HENTZE, J. (1967): Wasserbau. Teubners Fachbücher für Hoch- und Tiefbau. 14., neubearbeitete Auflage ed. Stuttgart.
- HLNUG. (2017): WRRL-Viewer [Online]. URL: wrrl.hessen.de [Stand: 17.01.2019].
- HÜTTE, M. (2000): Ökologie und Wasserbau: Ökologische Grundlagen von Gewässerverbauung und Wasserkraftnutzung. Berlin u.a.
- KNAUSS, J. (1979): Flachgeneigte Abstürze, glatte und rauhe Sohlrampen, München, Versuchsanstalt für Wasserbau, TU München, Bericht Nr.41.
- LANGE, G. (1993): Gewässerregulierung, Gewässerpflege: Naturnaher Ausbau und Unterhaltung von Fließgewässern, Hamburg u.a.

- LATTERMANN, E. (2005): Gewässerkunde, Flußbau, Stauanlagen, Wasserkraftwerke. BBB, Bauwerk-Basis-Bibliothek. 2., erw. und aktualisierte Aufl. ed. Berlin.
- LUBW (2007): Durchgängigkeit für Tiere in Fließgewässern. Leitfaden Teil 2 - Umgebungsgewässer und fischpassierbare Querbauwerke, Karlsruhe, Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden- Württemberg.
- NIEDERMAYR, A. (2008): V-Rampen - Ökologisch weitgehend durchgängige Querbauwerke. München, Versuchsanstalt für Wasserbau und Wasserwirtschaft, TU München, Bericht Nr.116.
- PATT, H.;GONSOWSKI, P. (2011): Wasserbau: Grundlagen, Gestaltung von wasserbaulichen Bauwerken und Anlagen. 7., aktualisierte Aufl. ed. Heidelberg u.a.
- PATT, H., JÜRGING, P.;KRAUS, W. (2011): Naturnaher Wasserbau: Entwicklung und Gestaltung von Fließgewässern. 4., aktualisierte Aufl. ed. Berlin u.a.
- PETER, G. (2005): Überfälle und Wehre: Grundlagen und Berechnungsbeispiele. Praxis. 1. Aufl. ed. Wiesbaden.
- PETSCHALLIES, G. (1989): Entwerfen und Berechnen in Wasserbau und Wasserwirtschaft: Fließgewässer, Sohlenbauwerke, Durchlässe, Düker, Wehranlagen, Hochwasserrückhaltebecken, Dämme, Rohrdränung. Wiesbaden u.a.
- SAURENHAUS, C. (2018): Bachelorarbeit Sohlenbauwerke - Wanderhindernisse. E-Mail. 18.12.2018, Darmstadt.
- SCHROEDER, W.;RÖMISCH, K. (2001): Gewässerregulierung, Binnenverkehrswasserbau, Düsseldorf.
- STROBL, T.;ZUNIC, F. (2006): Wasserbau: Aktuelle Grundlagen, neue Entwicklungen, Berlin u.a.
- USA - BUREAU OF RECLAMATION (1977): Design of small dams. Water resources technical publication. Revised Reprint ed. Denver, Colo.
- WHITTAKER, J. G.;JÄGGI, M. (1986): Blockschwellen. Mitteilungen der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie an der Eidgenössischen Technischen Hochschule Zürich. Zürich.
- WINKLER, H. (2009a): Rückbau von Querbauwerken - Möglichkeiten und Perspektiven. In: DWA (ed.) DWA-Themen: Naturnahe Sohlengleiten.
- WINKLER, H. (2009b): Umweltauswirkungen von Sohlenbauwerken. In: DWA (ed.) DWA-Themen: Naturnahe Sohlengleiten.

Anhangsverzeichnis

Anhang 1: Praxisbeispiele zu Abstürzen.....	61
Anhang 2: Praxisbeispiele zu Rampen und Gleiten	63
Anhang 3: Praxisbeispiele zu Schwellen	66
Anhang 4: Praxisbeispiele zur Sanierung	68
Anhang 5: Bestimmung der Sohlenschubspannung τ_0 nach DIN19661-2	73
Anhang 6: Tabellen zur Bestimmung von k_{st} und k_s	74
Anhang 7: Berechnung der Befestigungslängen nach DIN19661-2.....	75

Anhang 1: Praxisbeispiele zu Abstürzen

Absturz im Innenstadtbereich in Pfungstadt

Angaben zum Gewässerabschnitt

Gewässer/Land:	Modau/Hessen
Lage:	an der Kirche in Pfungstadt
Gewässerart:	Niederungsfließgewässer in Fluss- und Stromtälern
Fischregion:	Mischregion

Daten zum Bauwerk

Bauwerkstyp:	Absturz
Länge:	0 m
Breite:	2,3 m
Wasserspiegeldifferenz:	0,42 m

Beschreibung des Bauwerks



Der Absturz regelt die Fließgeschwindigkeit und Sohlenerosion der Modau, die durch Pfungstadt fließt. Im Innenstadtbereich ist der Fluss stark verändert und wenig naturnah. Der Absturz geht gleichmäßig über die gesamte Gewässerbreite. Somit entsteht ein einheitlicher Wasserstrahl über der senkrechten Absturzwand. Man kann erkennen, dass das Wasser vor dem Absturz strömt, dann beschleunigt über den Absturz schießt und hinter diesem durch eine kleine Deckwalze wieder zum Strömen übergeht.

Durch die gleichmäßige Überfallkante und die Höhe von über 40 cm ist dieser Absturz nur bedingt bis gar nicht flussaufwärts von Fischen passierbar. Deshalb besteht hier nach der Wasserrahmenrichtlinie Handlungsbedarf.

(Saurenhäus, 2018, HLNUG, 2017)

Absturz kurz vor der Beerbachmündung

Angaben zum Gewässerabschnitt

Gewässer/Land:	Beerbach/Hessen
Lage:	Darmstadt, kurz vor der Beerbachmündung
Gewässerart:	grobmaterialreicher, silikatischer Mittelgebirgsbach
Fischregion:	obere Forellenregion

Daten zum Bauwerk

Bauwerkstyp:	Absturz
Länge:	0 m
Breite:	2,8 m
Wasserspiegeldifferenz:	0,5 m

Beschreibung des Bauwerks



Dieser Absturz kurz vor der Beerbachmündung ist im naturnäheren Flusslauf außerhalb der Stadt. Auch hier geht der Absturz über die gesamte Gerinnebreite ohne Veränderung der Höhe. Das Wasser fällt in einem abgelösten Strahl über die senkrechte Kante. Das Bauwerk ist zwar flussabwärts passierbar, stellt flussaufwärts aber ein Wanderhindernis dar, so dass hier eine Umgestaltung sinnvoll wäre.

(Saurenhäus, 2018, HLNUG, 2017)

Angang 2: Praxisbeispiele zu Rampen und Gleiten

Umgestaltung einer glatten in eine raue Rampe am Hegbach

Angaben zum Gewässerabschnitt

Gewässer/Land:	Hegbach/Hessen
Lage:	Dreischläger Allee bei Egelsbach
Gewässerart:	Niederungsfließgewässer in Fluss- und Stromtälern
Fischregion:	Äschenregion

Daten zum Bauwerk

Bauwerkstyp:	Rampe/Gleite
Länge/Breite:	24 m/3,5 m
Gefälle:	1:25
Baujahr:	2007



Vorheriger Zustand

Vor dem Umbau war unter der Brücke eine glatte Rampe mit Gefälle 1:5 und einer Höhe von ca. 2,5 m in den Fluss gebaut. Diese war unpassierbar für Lebewesen. Die Bauweise der glatten Rampe entsprach nicht mehr dem Stand der Technik

Heutiger Zustand

2007 wurde diese Rampe abgerissen und stattdessen eine neue raue Rampe bzw. Gleite errichtet. Diese ist nun länger, hat ein niedrigeres Gefälle und ist so für Fische besser passierbar. Durch den Einsatz von Wasserbausteinen wurde der Gewässerabschnitt naturnah gestaltet. Eine ungleichmäßige Struktur auf der Rampe sorgt für verschiedene Strömungsgeschwindigkeiten.

Bauausführung

Für den Bau der neuen Rampe war eine Wasserhaltung nötig. Der Fluss wurde seitlich am eigentlichen Gewässerbett vorbeigeleitet, sodass in einer trockenen Rinne gebaut werden konnte. Mit Baggern wurde die alte Rampe abgerissen und Wasserbausteine für die neue Rampe platziert. Nach den Arbeiten wurde das Gewässerbett wieder geflutet.

(Saurenhaus, 2018, HLNUG, 2017)



Glatte Rampe vor dem Umbau (Saurenhaus, 2018)



Setzen der Steine mithilfe von Baggern (Saurenhaus, 2018)



Rampe nach dem Ausbau (Saurenhaus, 2018)

Raue Rampe am Sandbach

Angaben zum Gewässerabschnitt

Gewässer/Land:	Sandbach/Hessen
Lage:	bei Ortseinfahrt Eschollbrücken
Gewässerart:	Niederungsfließgewässer in Fluss- und Stromtälern
Fischregion:	Mischregion

Daten zum Bauwerk

Bauwerkstyp:	Raue Rampe
Länge:	10 m
Breite:	3 m
Gefälle:	1:8

Beschreibung des Bauwerks

Insgesamt ist der Sandbach in diesem Gewässerabschnitt stark verändert. Der Fluss ist auf beiden Seiten hoch eingedeicht, das Gewässerbett ist mit Beton oder Mauerwerk verbaut. Insgesamt ist dies ein sehr künstliches Gewässer mit schnurgeradem Verlauf. Kurz nach der Straßenbrücke, die nach Eschollbrücken führt, ist hier eine raue Rampe. Sie dient der Sohlenstabilisierung und überwindet eine Wasserspiegeldifferenz von 0,8 m. Die Rampe ist aus Wasserbausteinen hergestellt. Vor ihr ist die Sohle mit Betonplatten verbaut, die sich kurz vor der Rampe auf fast das Doppelte der Gewässerbreite aufweiten. So ist ein geregelter Abfluss über die Rampe ohne Rückstau gewährleistet. Auf der Rampe verringert sich der Durchmesser nach unten wieder, sodass der Gerinnedurchmesser wieder wie vor der Rampe ist. Ebenfalls ist die Rampe leicht gekrümmt, sodass sich der Abfluss in der Mitte konzentriert. Es ist zu erkennen, dass die hauptsächliche Energieumwandlung auf der Rampe selbst stattfindet. Nach der Rampe bildet sich kein Wechselsprung, aber etwas gewellter Abfluss aus.



(Saurenhäus, 2018, HLNUG, 2017)

Angang 3: Praxisbeispiele zu Schwellen

Grundschwelle in der Modau

Angaben zum Gewässerabschnitt

Gewässer / Land:	Modau / Hessen
Lage:	Ortsausgang Ober-Modau
Gewässerart:	Grobmaterialreicher, silikatischer Mittelgebirgsbach
Fischregion:	Untere Forellenregion

Daten zum Bauwerk

Bauwerkstyp:	Steinschwelle
--------------	---------------

Beschreibung des Bauwerks



Diese Schwelle ist aus Steinen gebaut. Man kann die leichte Krümmung zu den Uferseiten nach unterstrom hin erkennen. Anders als bei Abstürzen ist die Überfallkante durch die Steine über die Gewässerbreite unregelmäßig. An der Schwelle findet ein Fließwechsel statt und so werden kleine Verwirbelungen verursacht. Ansatzweise ist eine Kolkbildung unterhalb der

Schwelle zu sehen. Durch die geringe Höhe und den nicht abgelösten Strahl ist die Schwelle relativ gut passierbar für Lebewesen.

(Saurenhäus, 2018, HLNUG, 2017)

Stützwehr an der Koppenmühle

Angaben zum Gewässerabschnitt

Gewässer/Land:	Modau/Hessen
Lage:	An der Koppenmühle bei der B426
Gewässerart:	Grobmaterialreicher, silikatischer Mittelgebirgsbach
Fischregion:	Untere Forellenregion

Daten zum Bauwerk

Bauwerkstyp:	Stützwehr
Länge:	6,9 m
Breite:	14 m
Wasserspiegeldifferenz:	2,74

Beschreibung des Bauwerks



Dieses Stützwehr ist ein festes Wehr, das sowohl die Modau staut, als auch für die Wasserkraftgewinnung eingesetzt wird. Es hat einen langen, steil geneigten Rücken, der wie eine Schussrinne fungiert. Im trockenen Zustand lässt sich gut die Wehrform erkennen.

Das Wasser strömt seitlich auf das Wehr zu, schießt über den Wehrrücken in das Tosbecken, das mit großen Wasserbausteinen gesichert ist. Zwischen Tosbecken und Wehrrücken gibt es einen kleinen abgelösten Strahl, bevor dem Wasser im Tosbecken Energie entzogen wird und es nach dem Tosbecken wieder strömend weiterfließt. Das Wehr verursacht oberstrom einen Rückstau des Wassers, sodass die Fließgeschwindigkeit stark reduziert wird.



(Saurenhaus, 2018, HLNUG, 2017)

Anhang 4: Praxisbeispiele zur Sanierung

Umbau einer Wehrplatte in eine raue Riegelrampe an der Modau

Angaben zum Gewässerabschnitt

Gewässer/Land:	Modau/Hessen
Lage:	Nieder-Ramstadt an Tennisanlagen
Gewässerart:	Grobmaterialreicher, silikatischer Mittelgebirgsbach
Fischregion:	Untere Forellenregion

Daten zum Bauwerk

Bauwerkstyp:	Riegelrampe/Gleite
Länge/Breite:	78 m/5 m
Gefälle:	1:30
Baujahr:	2014



Vorheriger Zustand

Eine betonierte Wehrplatte aus einer alten Nutzung als Mühlenwehr machte den Fluss unpassierbar. Die Wasserspiegeldifferenz betrug 2 m. Neben der Wehrplatte befand sich eine Absturztreppe als Fischeaufstieg, was allerdings nicht für eine gute Durchgängigkeit genügt.

Heutiger Zustand

Die Wehrplatte wurde abgerissen und eine lange, gebogene Gleite in Riegelbauweise mit 20 Riegeln gebaut. In den einzelnen Riegeln wurde ein Lückensystem mit Abständen von 40 cm zwischen den Steinen eingerichtet, um eine gute Durchgängigkeit zu garantieren und unterschiedliche Strömungsbereiche zu erzeugen. So entstanden zusätzlich strömungsberuhigte Bereiche als Fischrefugien.

Bauausführung

Der Bau wurde mithilfe von Baggern ausgeführt. Die Riegel sind aus Wasserbausteinen gebaut, die durch weitere Steine am Ufer eingebunden wurden. Zusätzlich wurde das Ufer über die gesamte Länge der Gleite mit Steinen gesichert. Der Bau wurde in fließender Welle durchgeführt.

(Saurenhaus, 2018, HLNUG, 2017)



Zustand vor der Sanierung (2007) (Saurenhaus, 2018)



Riegelrampe nach dem Ausbau



Ausbau der Riegel mit Lückensystem (Saurenhaus, 2018)

Umwandlung eines Absturzes in eine Rampe am Sandbach

Angaben zum Gewässerabschnitt

Gewässer/Land:	Sandbach/Hessen
Lage:	im Wald Pfungstadts
Gewässerart:	Niederungsfließgewässer in Fluss- und Stromtälern
Fischregion:	Mischregion

Daten zum Bauwerk

Bauwerkstyp:	Rampe
Länge/Breite:	23 m/7 m



Vorheriger Zustand

Zur Sohlensicherung war hier ein Absturz mit senkrechter Absturzkante gebaut worden, sodass Fische diesen nicht passieren konnten.

Heutiger Zustand

Der Absturz wurde unterstrom mit großen Wasserbausteinen aufgefüllt, sodass die Steine mit der Überfallkante abschließen. Durch eine unregelmäßige Verteilung der Steine wurden verschiedene Strömungsmuster geschaffen, die einen Aufstieg erleichtern. Allerdings ist immer noch die Absturzkante über die gesamte Gewässerbreite zu sehen, was das Lückensystem der Rampe beeinträchtigt. Das Ufer ober- und unterstrom ist befestigt mit betonierten Steinen bzw. Mauerwerk.

(Saurenhaus, 2018, HLNUG, 2017)



Rampe mit sichtbarer Absturzkante

Abriss der Rampe und Laufverlängerung am Beerbach

Angaben zum Gewässerabschnitt

Gewässer/Land:	Beerbach/Hessen
Lage:	In der Nähe des Haus Burgwald
Gewässerart:	Grobmaterialreicher, silikatischer Mittelgebirgsbach
Fischregion:	Obere Forellenregion

Daten zum Bauwerk

Bauwerkstyp:	Laufverlängerung
Baujahr:	2017



Vorheriger Zustand

Eine steile Rampe in Setzsteinbauweise mit einem Gefälle von 1:5, einer Länge von 10,5 m und einer Breite von 4,5 m wurde hier nach dem Abriss eines Wehres zur Sohlenstabilisierung gebaut. Allerdings ist diese nur bedingt passierbar für Fische und Wasserorganismen.

Heutiger Zustand

Nach Abriss der Rampe wurde der Lauf des Baches durch eine Kurve verlängert und somit das Gefälle verringert. Die Ufer wurden zusätzlich mit Totholz gesichert. Am früheren Rampenkopf stabilisieren Wasserbausteine und Kies die Sohle. Somit wird die naturnahe Entwicklung und Sohlenanhöhung gefördert.

Bauausführung

Der Bau wurde in fließender Welle mit Baggern durchgeführt. Wasserbausteine wurden eingesetzt und der Bachlauf neu definiert.

(Saurenhaus, 2018, HLNUG, 2017)



Rampe vor der Laufverlängerung (Saurenhaus, 2018)



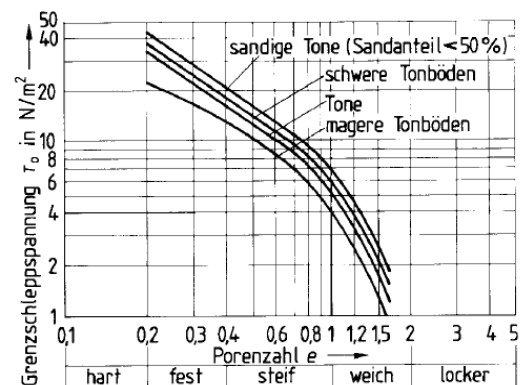
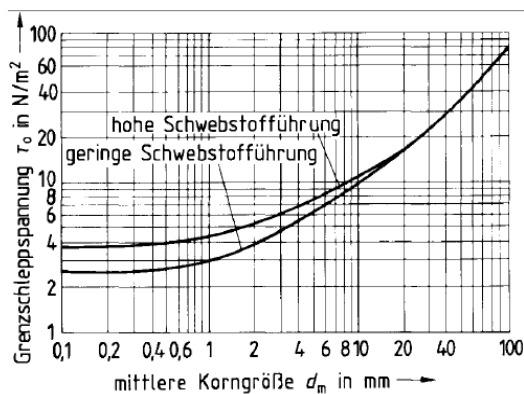
Kurve mit Ufersicherung



Totholz als Böschungssicherung (Saurenhaus, 2018)

Anhang 5: Bestimmung der Sohlschubspannung τ_0 nach DIN19661-2

Sohlenbeschaffenheit		τ_0 N/m ²
Einzelkorn- gefüge vor- herrschend	Feinsand, Korngröße 0,063 mm bis 0,2 mm	1,0
	Mittelsand, Korngröße 0,2 mm bis 0,63 mm	2,0
	Grobsand, Korngröße 0,63 mm bis 1 mm	3,0
	Grobsand, Korngröße 1 mm bis 2 mm	4,0
	Grobsand, Korngröße 0,63 mm bis 2 mm	6,0
	Kies-Sand-Gemisch, Korngröße 0,63 mm bis 6,3 mm, festgela- gert, langanhaltend überströmt	9,0
	Kies-Sand-Gemisch, Korngröße 0,63 mm bis 6,3 mm, festgela- gert, kurzzeitig überströmt	12,0
	Mittelkies, Korngröße 6,3 mm bis 20 mm	15,0
	Grobkies, Korngröße 20 mm bis 63 mm	45,0
	plattiges Geschiebe, 1 cm bis 2 cm hoch, 4 cm bis 6 cm lang	50,0
Boden wenig kollodial	lehmiger Sand	2,0
	lehmhaltige Ablagerungen	2,5
	lockerer Schlamm	2,5
	lehmiger Kies, langanhaltend überströmt	15,0
	lehmiger Kies, kurzzeitig überströmt	20,0
Boden stark kollodial	lockerer Lehm	3,5
	festgelagerter Lehm	12,0
	Ton	12,0
	festgelagerter Schlamm	12,0
Rasen verwachsen	Rasen, langanhaltend überströmt	15,0
	Rasen, kurzzeitig überströmt	30,0

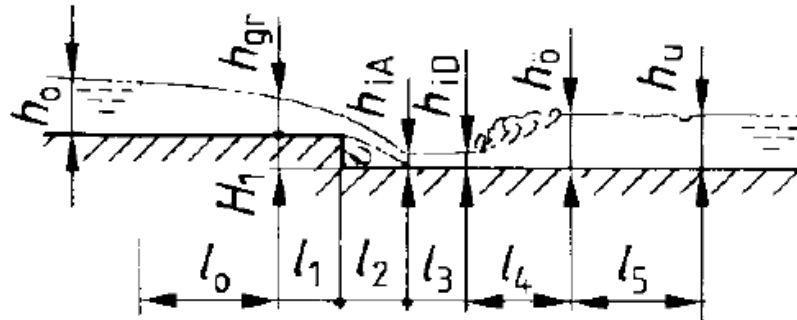


Anhang 6: Tabellen zur Bestimmung von k_{st} und k_s (Patt et al., 2011, DVWK, 1990)

k_{Stu} -Werte		k_{Stu} -Werte	
<i>Natürliche Wasserläufe:</i>		<i>Erdkanäle:</i>	
Fluss mit fester Sohle, ohne Unregelmäßigkeiten	40–42	Festes Material, glatt	60
Fluss m. mäßigem Geschiebe	35–38	Fester Sand m. etwas Ton und Schotter	50
Fluss, verkrautet	30–35	Sohle aus Sand und Kies, Böschung gepflastert	45–50
Fluss mit Geröll und Unregelmäßigkeiten	30	Feinkies	40
Fluss, reich an grob. Geschiebe	28–30	Grobkies	35
Vorland, je nach Bewuchs	15–20	Scholliger Lehm	30
Wildbach mit grobem Geröll	15–20	mit groben Steinen ausgelegt	26–30
Wildbach mit grobem Geröll, Geschiebe in Bewegung	10–15	Sand, Lehm, Kies, stark bewachsen	20–26
<i>Felskanäle:</i>			
mittelgrob ausgebrochen	25–30		
sorgfältig ausgesprengt	20–25		
sehr grober Ausbruch	15–20		

Sohlenaufbau	k_s -Werte [mm]
<i>Fels:</i>	
nachgearbeitet gleichmäßig	220–350
mittelgrob	450–700
<i>Erdkanäle:</i>	
regelmäßig, je nach Ausführung	15–60
sehr guter Zustand, frei von Bewuchs	6–10
Sohle und Böschung schlammig, sehr regelmäßig	25–50
steiniger Boden, vereinzelt Pflanzen	80–140
stärker bewachsen	190–270
schlechter Zustand	300–500
bei Geschiebetrieb	100–200
stark verkrautet	500–1500
<i>Steine und Kiese (kein Transport):</i>	
Grobkies, Böschungen etwas angegriffen, Sohle mit einigen Steinen	50–54
<i>Steine und Kiese (kein Transport):</i>	
gut gerundeter Kalksteinschotter (bis 5 cm)	
Zwischenräume durch Sand und Schlamm ausgeglichen	30–40
Sand und Kies bis 6 cm, Böschungen stellenweise schlammig	20–55
gleichförmig gebrochene Steine, geschüttet, 10–20 cm groß, ebene Sohle	16–18

Anhang 7: Berechnung der Befestigungslängen nach DIN19661-2 (2000-09)



Die Länge der Befestigung ergibt sich aus den Einzelstrecken hinter dem Absturz, also aus l_2 bis l_5 . Die Einzelstrecken berechnen sich nach DIN19661-2 (2000-09) wie folgt:

$$l_1 = 5 \cdot h_{gr}$$

$$l_2 = 4,3 \cdot \left(\frac{h_{gr}}{H+z} \right)^{\frac{1}{3}} \cdot \sqrt{h_{gr} \cdot (H+z)}$$

$$l_3 = 4 \cdot k_{st} \cdot \left(\frac{h_{iD}}{h_{iA}} \right)^2 \cdot (h_{iD} - h_{iA})$$

$$l_4 = 5 \cdot (h_u - h_{iD}) \text{ bei } Fr < 0,32$$

$$l_4 = 6 \cdot (h_u - h_{iD}) \text{ bei } Fr \geq 0,32$$

$$l_5 \approx l_4$$

Bei einem Abflusstyp c des Absturzes entfällt l_3 , da hier h_{iD} und h_{iA} zusammenfallen. Die Endschwelle z ist ebenfalls zu berücksichtigen, wenn der Abflusstyp nicht c entspricht.

Abschlussarbeit von

Frau Annika Scheidler

Erklärung zur Abschlussarbeit gemäß § 22, Abs. 7 APB

Hiermit versichere ich, die vorliegende Abschlussarbeit ohne Hilfe Dritter nur mit den angegebenen Quellen und Hilfsmitteln angefertigt zu haben.

Alle Stellen, die aus den Quellen entnommen wurden, sind als solche kenntlich gemacht worden.

Diese Arbeit hat in gleicher Form oder ähnlicher Form noch keiner Prüfungsbehörde vorgelegen.

Darmstadt, den 31.01.2019



Unterschrift